

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Institut dopravy - 342**

**Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů  
na údržbu vybraných částí tramvaje**

Assessment of Operational Reliability and Costs  
of Maintenance of Selected Parts of a Tram

Student: Bc. Radek Řehák

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Řehák**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie  
Specializace: 10 Kolejová doprava  
Téma: Posouzení provozní spolehlivosti a nákladů na údržbu vybraných  
konstrukčních částí tramvaje  
Assessment of Operational Reliability and Costs of Maintenance of  
Selected Parts of Tram  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je posoudit dosaženou provozní spolehlivost vybraných konstrukčních skupin tramvaje s využitím stochastických modelů spolehlivosti. S využitím dat o spolehlivosti predikovat náklady údržby.

1. Úvod.
2. Popis vybraných konstrukčních skupin tramvaje.
3. Výpočetní metody používané při prokazování spolehlivosti a predikce nákladů údržby.
4. Posouzení provozní spolehlivosti a případné návrhy změn v systému údržby.
5. Predikce nákladů údržby.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Famfulík, J. a kol. Zkoušky spolehlivosti. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2277-8.

Famfulík, J. Teorie údržby. VŠB – TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1029-8.

Daněk, A. Výpočetní metody obnovy dopravních prostředků. Repronis, Ostrava, 1999. ISBN 80-86122-41-7.

ČSN IEC 61650: 1998. Techniky analýzy dat o bezporuchovosti.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



---

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Ve Sviadnově .....3.5.2014.....

.....Petr Pochy.....

podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60-školní dílo
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB- TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB- TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněné v informačním systému VŠB- TUO
- было́ сје́днано, že s VŠB- TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona
- было́ сје́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB- TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB- TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o veřejných školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

Ve Sviadnově .....3.5.2014.....

.....Řehák Radek.....

podpis studenta

**Jméno a příjmení autora práce:**

Bc. Radek Řehák

**Adresa trvalého pobytu:**

Ostravská 80, Sviadnov, 739 25, Frýdek – Místek

# ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŘEHÁK, R. *Posouzení provozní spolehlivosti a nákladu na údržbu vybraných částí tramvaje*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017, 60 s. Diplomová práce, vedoucí: Famfulík J.

Cílem práce je posoudit s využitím stochastických modelů spolehlivosti dosaženou provozní spolehlivost vybraných konstrukčních skupin tramvaje. S využitím dat o spolehlivosti predikovat náklady LCC.

V teoretické části je nejprve popsána konstrukce trakčního podvozku tramvaje INEKON 2001 TRIO. Trakční podvozek je rozdělen do pěti konstrukčních celků. Dále jsou popsány systémy preventivní údržby a základní stochastické metody určené k posouzení spolehlivosti. V praktické části je nejprve odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti s použitím profesionálního softwaru WEIBULL++. Po odhadech parametrů následuje simulace životního cyklu trakčního podvozku po dobu 30 let (tj. 1 800 000 Km) s využitím stromu poruch v softwaru BLOCKSIM. Spolehlivost podvozků je posuzovaná podle hodnoty pohotovosti. V poslední části jsou na základě informací provozovatele a odborného odhadu vyčíslený predikované náklady LCC.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŘEHÁK, R. *Assessment of Operational Reliability and Costs of Maintenance of Selected Parts of a Tram*. Ostrava: Institute of Transportation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2017, 60 pages. Master Thesis, supervised by: Famfulík J.

The aim of the thesis is to assess the operational reliability of selected assemblies of the trams by using stochastic models of reliability achieved. With the use of reliability figures to predict LCC costs.

In the theoretical part is at first described design of the traction bogie of tram INEKON 2001 TRIO. Traction bogie is divided into five assemblies. Further disclosed are systems preventive maintenance and basic stochastic methods designed to assess the reliability. In the practical part are first estimate of the probability distribution parameters using professional software WEIBULL ++. After estimating the parameters followed by simulation life cycle traction bogie for 30 years (ie. 1,8 million kilometres) with using a fault tree in the software BLOCKSIM. Reliability bogies are assessed according to the value of availability. In the last part are on based information of operator and professional estimate quantified predicted LCC costs.

## **Poděkování**

Tímto děkuji mému vedoucímu panu doc. Ing. Janu Famfulistovi, Ph.D. za vedení, konzultace a pomoc při tvorbě této práce.

# Obsah

<b>Seznam použitého značení.....</b>	<b>10</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Technický popis tramvaje INEKON 2001 TRIO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 Trakční podvozek a jeho vybrané konstrukční celky .....</b>	<b>16</b>
2.1 Dvojkolí .....	18
2.2 Ložisková komora a primární vypružení .....	19
2.3 Sekundární vypružení a hydraulický tlumič.....	20
2.4 Trakční motor .....	20
2.5 Zubová spojka.....	21
2.6 Nápravová převodovka .....	21
2.7 Brzdové zařízení .....	23
2.8 Pískovací a mazací zařízení .....	24
<b>3 Systémy preventivní údržby.....</b>	<b>25</b>
3.1 Denní ošetření (denně před výjezdem tramvaje na trať).....	25
3.2 Kontrolní prohlídka (10 000 km $\pm$ 20%) .....	26
3.3 Střední oprava (200 000 km $\pm$ 20%).....	26
3.4 Velká oprava (600 000 km $\pm$ 20%) .....	27
3.5 Generální oprava (1 200 000 km $\pm$ 20%).....	27
<b>4 Výpočetní metody používané při prokazování spolehlivosti a predikce LCC .....</b>	<b>28</b>
4.1 Exponenciální rozdělení.....	28
4.2 Weibullovo rozdělení.....	31
4.3 Test dobré shody Kolmogorov – Smirnov.....	34
4.4 Analýza stromu poruchových stavů (FTA).....	35
4.5 Náklady životního cyklu LCC.....	37
<b>5 Posouzení provozní spolehlivosti konstrukčních celků podvozku tramvaje .....</b>	<b>40</b>
5.1 Odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti konstrukčních celků .....	40
5.1.1 Lineární regrese pískovací a mazací zařízení – Excel.....	41



5.1.2	Lineární regrese pískovací a mazací zařízení – WEIBULL++ .....	44
5.1.3	Porovnání bodového odhadu z Excelu s výsledkem bodového odhadu ze softwaru WEIBULL ++ .....	46
5.1.4	Odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti ostatních konstrukčních skupin.....	47
5.2	Simulace životního cyklu podvozku tramvaje .....	48
5.3	Učení spolehlivosti podvozku .....	51
<b>6</b>	<b>Predikce nákladu LCC .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam literatury a použitých zdrojů .....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>59</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>61</b>
	<b>Příloha A – kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov – Smirnov .....</b>	<b>62</b>
	<b>Příloha B – odhad parametrů rozdělení (pískovací a mazací zařízení).....</b>	<b>63</b>
	<b>Příloha C – odhad parametrů rozdělení (brzdové zařízení) .....</b>	<b>64</b>
	<b>Příloha D – odhad parametrů rozdělení (trakční pohon) .....</b>	<b>65</b>
	<b>Příloha E – odhad parametrů rozdělení (kola a vypružení) .....</b>	<b>66</b>
	<b>Příloha F – náklady na preventivní údržbu.....</b>	<b>67</b>
	<b>Příloha G – náklady na údržbu po poruše.....</b>	<b>70</b>

## Seznam použitého značení

DC	stejnoseměrné napětí
DO	denní prohlídka
KP	kontrolní prohlídka
SO	střední oprava
VO	velká oprava
GO	generální oprava
LCC	náklady životního cyklu
t	doba provozu
l	kilometrický proběh
$F(t,l)$	distribuční funkce
$f(f,l)$	hustota pravděpodobnosti
$R(t,l)$	pravděpodobnost bezporuchovosti
$\lambda$	intenzita poruch
dt	diferenciál času
$T_s$	střední doba do poruchy
$l_s$	střední kilometrický proběh do poruchy
$F_i(m)$	odhad mediánového pořadí
$n_i$	pořadové číslo poruchy
n	celkový počet poruch
m	parametr tvaru Weibullova rozdělení
$t_0$	parametr měřítka Weibullova rozdělení
$\Gamma$	gama funkce
*	hodnoty pocházejí ze softwaru WEIBULL++
P	proporcionalita
$\chi^2$	statistika chí kvadrát
$H_0$	nulová hypotéza
$H_1$	alternativní hypotéza
D	testovací kritérium
$D_{n; 1-\alpha}$	kritická hodnota testu na hladině významnosti $\alpha$
$\Delta F$	rozdíl výběrové a teoretické distribuční funkce
FTA	analýza stromu poruch
$F_{OR}$	pravděpodobnost výskytu poruchy na hradle OR
$F_{AND}$	pravděpodobnost výskytu poruchy na hradle AND
$N_p$	pořizovací náklady
$N_v$	vlastnické náklady
SW	software

RAMS	bezporuchovost, pohotovost, udržitelnost, bezpečnost
$R^2$	hodnota korelace
$W_2P$	dvouparametrické Weibullovo rozdělení
$W_3P$	tříparametrické Weibullovo rozdělení
Ex	exponenciální rozdělení
C	hodnota konfidenční úrovně
PM	preventivní údržba
CM	údržba po poruše
MDBF	střední ujetá vzdálenost mezi poruchami
MTBF	střední doba mezi poruchami
MUT	střední doba použitelného stavu
MDT	střední doba nepoužitelného stavu
A	pohotovost
$A_i$	inherentní pohotovost
$A_t$	technická pohotovost

# Úvod

Výroba tramvají v České (Československé) republice má svou dlouholetou tradici a prestiž nejen u nás, ale i za našimi hranicemi. První tramvaje byly vyrobeny v 19. století a byly taženy koňmi. Konstrukce prvních tramvajových vozů vycházela z tehdejších železničních vozů, ovšem ve zmenšené a odlehčené podobě. Tato koncepce umožňovala tažení koňmi a také projíždění oblouku s velmi malými poloměry v městských uličkách. Koněspřežné tramvaje byly zanedlouho nahrazeny tramvajemi s jiným pohonem. Nejdříve to byly tramvaje parní a následně tramvaje elektrické, které odebíraly elektrickou energii pomocí trolejového vedení. Elektrické tramvaje ve své podstatě vidíme dodnes.

První tramvaje v českých zemích vyrobila továrna Františka Ringhofferova v roce 1876 pro pražskou koňku. Jednalo se o vozy otevřené a tažené koňským spřežením. Od druhé poloviny 90. let 19. století vyráběly Ringhofferovy závody i tramvaje elektrické. Po druhé světové válce byla firma znárodněna a přejmenována na Vagónku Tatra Smíchov, která se pak stala v roce 1963 součástí státního podniku ČKD Praha. Firma ČKD Praha se postupně stala největším výrobcem tramvají na světě. V roce 1963 také byla zahájena sériová výroba nejvýznamnější tramvaje pod označením T3, které se vyrobilo 14 000 kusů. Výroba tramvají v ČKD Praha byla ukončena v roce 2003. O několik málo let se celá společnost dostala do úpadku.

Dnes mezi významné výrobce patří hned několik firem, které vyrábí tramvaje s odbytem po celém světě. Jedním z velkých výrobců je společnost Škoda Transportation, která od roku 1997 vyrábí své vlastní tramvaje, přičemž již o několik let dříve začala provádět kompletní modernizace starších tramvají pro české dopravní podniky. Z historie je však Škoda velice známá jako výrobce elektrických komponentů pro tramvaje jiných dopravců. První tramvají byla částečně nízkopodlažní Astra s označením ŠKODA 03T, která byla společným projektem dalšího dnešního výrobce tramvají Inekon group. Inekon group je inženýrskou organizací, která vyvíjí a konstruuje moderní nízkopodlažní tramvaje. Dalším výrobcem tramvají je Aliance TW Team, který se zpočátku věnoval modernizaci vozidel. Od roku 2004 se věnuje vývoji a výrobě vlastních tramvají.

V dnešní době se klade čím dál větší důraz na bezpečnost, na což musí výrobci kolejových vozidel myslet hned při jeho návrhu. Bezpečnost je ovlivněna řadou činitelů, jako např. stavem dopravní cesty, organizací provozu, lidským faktorem a je tak podmíněna částečně i spolehlivostí dopravních prostředků. Na požadavek spolehlivosti dopravních prostředků zareagovali jak výrobci, tak i provozovatelé zavedením systémů údržby. Cílem systémů údržby je zajistit bezchybný technický stav vozidel po celou dobu životnosti. V dnešní době jsou systémy údržby zavedeným projektem založeným

na statistických metodách. A však v počátcích byla spolehlivost pouze odhadována na základě praktických zkušeností.

Jelikož konkurence výrobců tramvaji nejen u nás je obrovská, tak je zapotřebí navrhovat a vyrábět za co nejnížší cenu, ale zároveň s co nejvyšší spolehlivostí. Proto dnes zákazník nezajímá jen cena za pořízení nového vozidla, ale především se zajímá o analýzu nákladu životního cyklu. Na základě těchto analýz se pak rozhoduje, které vozidlo si pořídí do svého vozového parku.

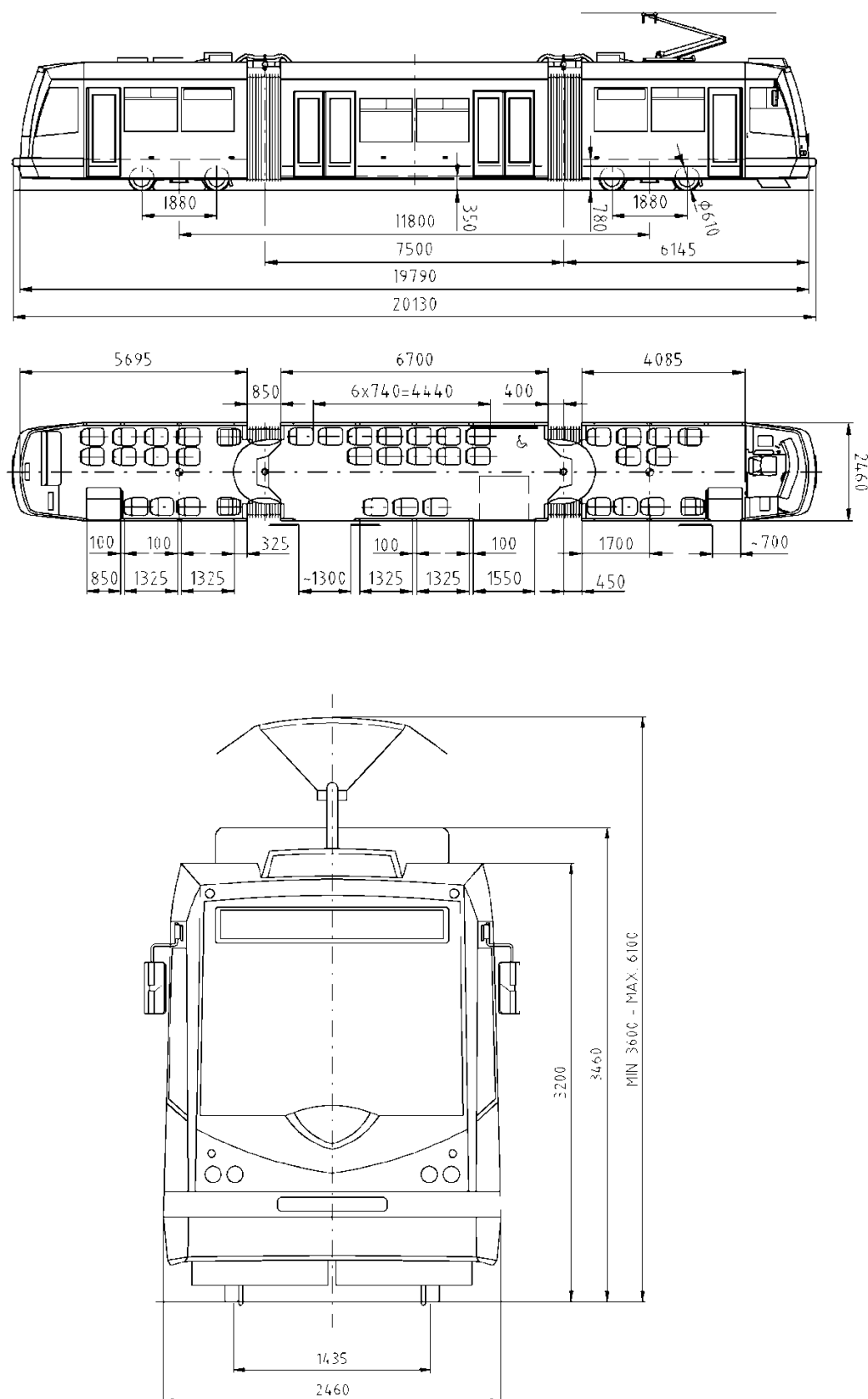
# 1 Technický popis tramvaje INEKON 2001 TRIO

Nízkopodlažní jednosměrná tříčlánková tramvaj INEKON 2001 TRIO je složená ze dvou krajních článků s výškou podlahy 780 mm na TK a jednoho vloženého závěsného středního článku s výškou podlahy 350 mm nad TK. Krajní články jsou uloženy na trakčních podvozcích. Střední článek je kloubově spojen s krajními články. [5]

Skříň článků jsou ocelové konstrukce svařené ze spodku, střechy, bočnic a koster čel. Čela jsou zhotovena ze skelného laminátu. Ostatní části skříň jsou příhradové svařované ocelové konstrukce, tvořené především z uzavřených a ohýbaných profilů. Vnější plechy bočnic a skla oken jsou ke kostře přilepené. Tramvaj je opatřena dvěma trakčními neotočnými podvozky. Trakční podvozek je dvounápravový s vnitřním rámem. Každá náprava je poháněna vlastním trakčním motorem. Výkon trakčního motoru je na nápravu přenášen zubovou spojkou a nápravovou převodovkou. Podvozek může brzdit elektrodynamickou brzdou, mechanickými kotoučovými brzdami ovládanými elektrohydraulicky a elektromagnetickými kolejnicovými brzdami.

**Tab. č. 1.1: Technické parametry tramvaje [5]**

Technické parametry INEKON 01 TRIO	
rozchod	1 435 mm
napájecí soustava	600 V DC (750 V DC)
maximální rychlost	70 km/h
výkon trakčních motorů	4 x 90 kW
sklon tratě	80‰ až max. 90‰
délka vozu	20 130 mm
rozvor podvozku	1 880 mm
vzdálenost podvozků	11 800 mm
šířka vozu	2 460 mm
výška vozu při staženém sběrači	3 460 mm
pracovní rozsah sběrače	3 600 – 6 100 mm nad TK
výška podlahy	350/780 mm nad TK
podíl nízkopodlažní části vozu	50%
průměr kol max./min.	610/530 mm
Minimální poloměr oblouku tratě	
ve vertikální rovině	250 m
v horizontální rovině	18m
manipulační oblouk	16m
Pohotovostní hmotnost vozidla	26 000 kg ± 5%
Maximální obsaditelnost	
míst k sezení	41
míst k stání	99



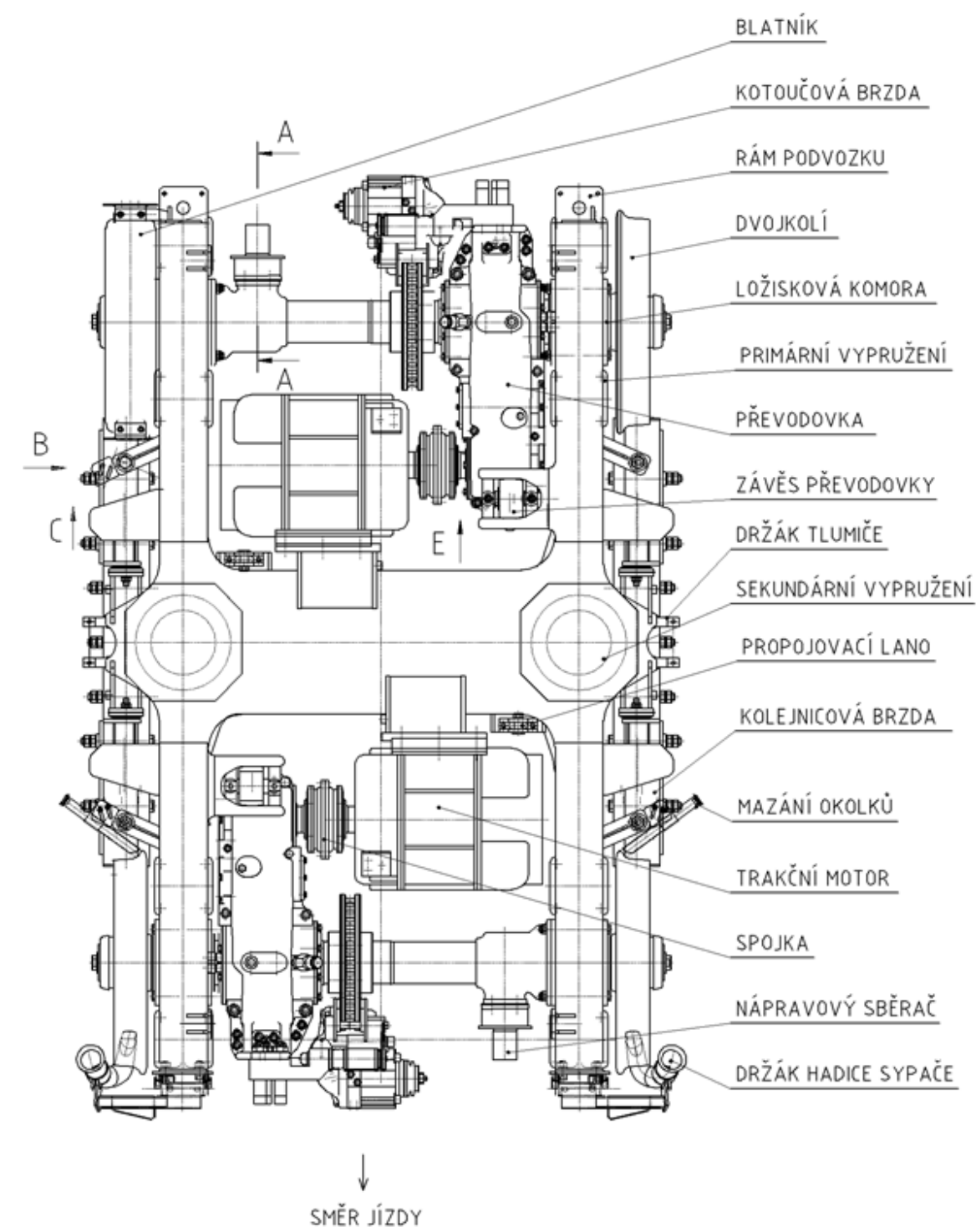
Obr. č. 1.1: Typový výkres tramvaje INEKON 2001 TRIO [5]

## 2 Trakční podvozek a jeho vybrané konstrukční celky

Tramvaj má dva dvounápravové trakční podvozky, které jsou umístěny pod krajními články. Podvozky nejsou otočné, ale uložení skříně v podvozku umožňuje malý vzájemný pohyb kolem svislé osy omezený nárazkami. Mají vnitřní rám tvaru H, svařený z ocelových plechů. Podélný a příčný nosník rámu tvoří uzavřené nosníky. Podvozky jsou vybaveny primárním a sekundárním vypružením. Primární vypružení je tvořeno pryžokovovými pružícími prvky mezi ložiskovými skříněmi nápravových ložisek a rámem podvozku. V příčné ose podélníků rámu jsou lůžka ocelových pružin sekundárního vypružení, řešeného bez kolébky. Sekundární vypružení tvoří dvě sady šroubových pružin. Jejich propnutí je omezeno pryžovým dorazem v ose každé sady a pohyb skříně tramvaje tlumen dvěma hydraulickými tlumiči na každém podvozku. Rovněž souměrně okolo příčné osy podvozku jsou z vnějšku na podélných nosnících opěrné plochy pro rozsochy kolejnicových brzd, držáky pro zavěšení kolejnicových brzd, vodítka pro pryžové bloky na přenos podélných sil mezi podvozkem a skříní tramvaje, na koncích podélníků dvojice přírub pro upevnění pružin primárního vypružení, nárazky na přenos příčných sil a místa pro upevnění blatníků a držáků hadic sypačů a mazání okolků. Na příčníku rámu podvozku jsou rovněž souměrně dle příčné osy podvozku dvě konzoly pro připevnění dvou trakčních motorů a dvě lanové spojky, které brání při zvedání vozidla oddělení podvozku od skříně. [5]

Každý trakční motor pohání jednu nápravu. Osa trakčního motoru je rovnoběžná s nápravou. Nápravy jsou uloženy v kuželíkových kompaktních ložiskových jednotkách v ložiskových komorách a jsou opatřeny nápravovým sběračem a nalisovaným kotoučem brzdy. Výkon trakčního motoru je na kola přenášen dvoustupňovou nápravovou převodovkou s čelními ozubenými koly přes zubovou spojku. Reakční moment převodovky je zachycován pomocí svislé závěsky. Na nápravách jsou nalisována vypružená kola. Dvojkolí je s rámem podvozku spojeno dvěma páry pružin primárního vypružení, nalisovaných do připravených otvorů v ložiskových skříních, a pojištěno proti oddálení při zvedání záchytkami nad skříní nápravových ložisek. Na skříní převodovky je konzola pro namontování kotoučové brzdy, působící na kotouč na nápravě. Všechna kola jsou opatřena blatníky se zástěrkami. Opotřebením okolků kol první a třetí nápravy snižuje namontované mazání okolků. To je provedeno tyčinkami tuhého maziva, vloženými do aplikátorů, které jsou namontovány na držáky na konzolách zavěšení kolejnicových brzd.



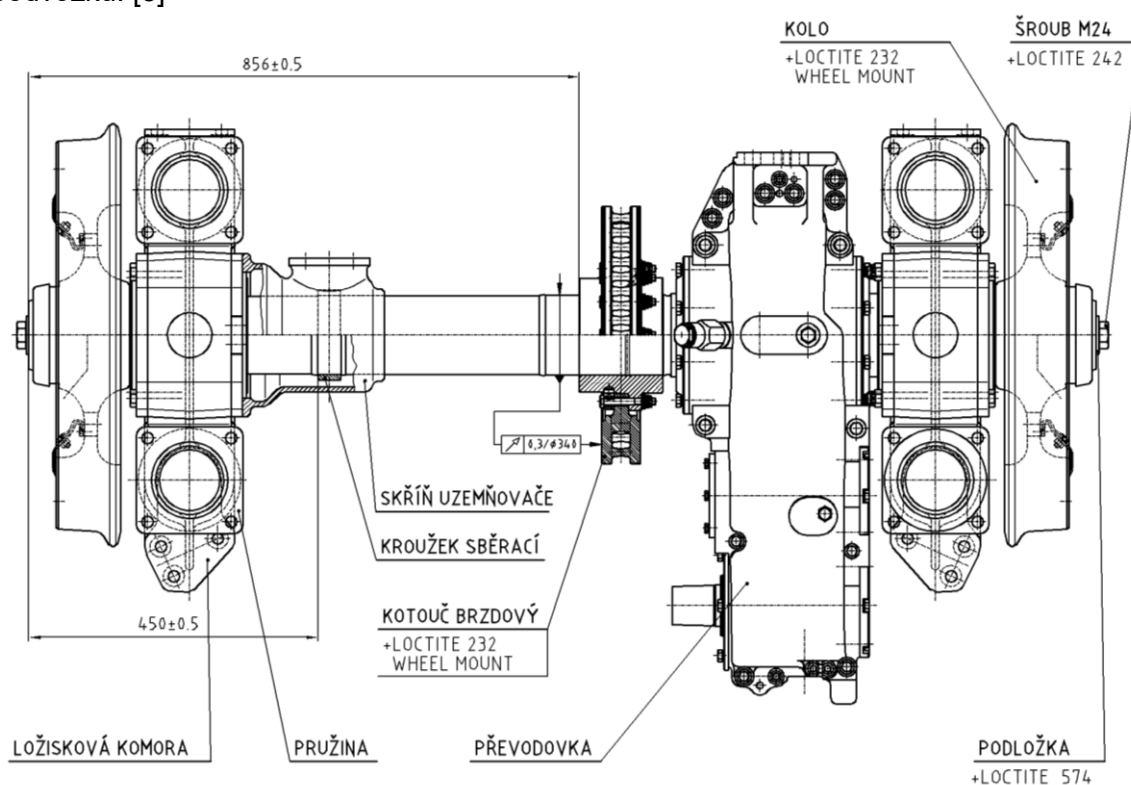


Obr. č. 2.1: Půdorys konstrukčního řešení trakčního podvozku [5]

## 2.1 Dvojkolí

### - Náprava

Uspořádání dvojkolí je patrné z obr. č. 2.2. Hlavním dílem je náprava jako výstupní hřídel z nápravové převodovky. Na nápravě je nalisován náboj s brzdovým kotoučem, kroužek nápravového sběrače, valivá ložiska uložená v ložiskových komorách a vypružená kola. V každé ložiskové komoře jsou svými čepy zalisovány dvě pryžokovové pružiny primárního vypružení. Přes příruby těchto pružin je dvojkolí spojeno s rámem podvozku. [5]

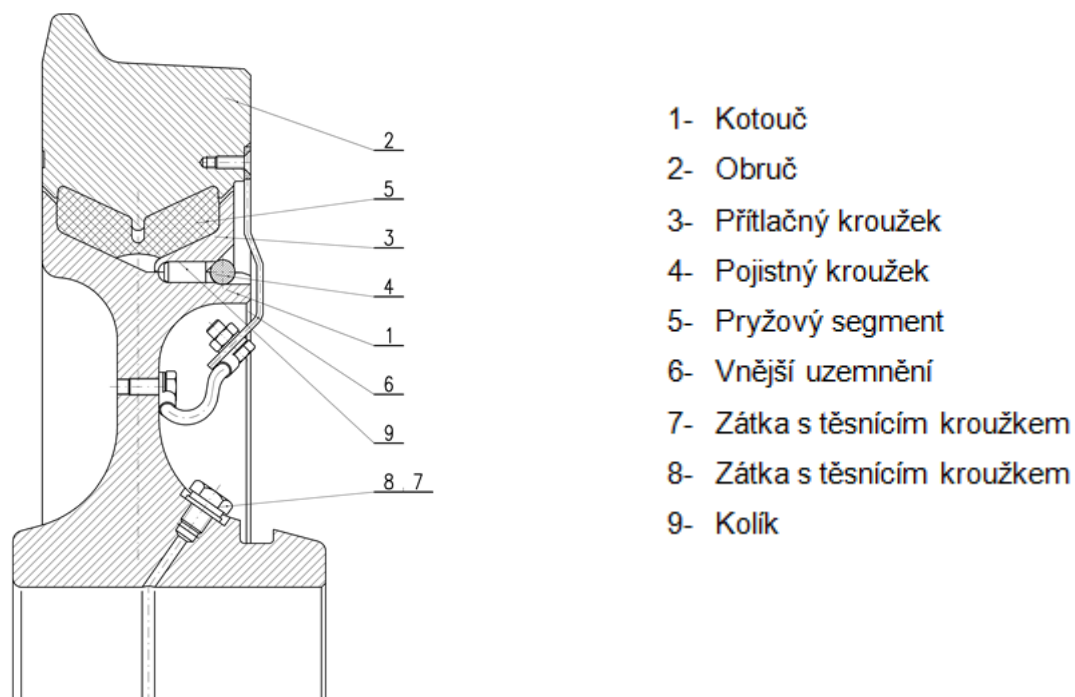


Obr. č. 2.2: Půdorys konstrukčního řešení dvojkolí [5]

### - Vypružené kolo

Vypružené kolo s pryžovými segmenty je jedním ze stavebních kamenů dvojkolí. Jako hlavní díl pojezdu je kolo určené k nesení a vedení vozidla v koleji a přenosu tažných a brzdných sil.

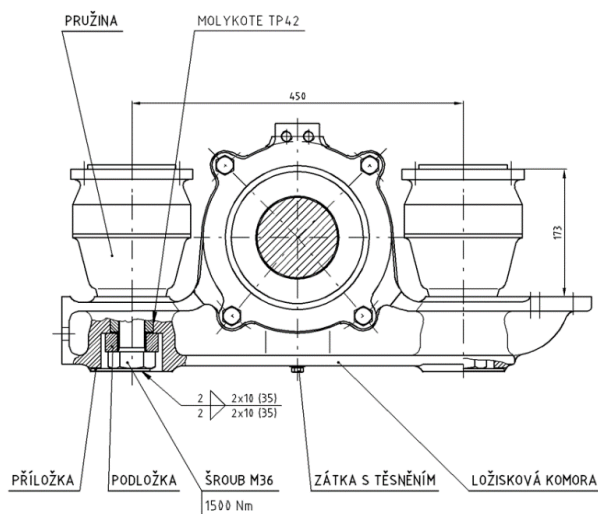
Ke snížení dynamických účinků na cestující, vibrací a hluku vyvolaných ve styku kola s kolejnicí je obruč odpružená pomocí pryžových segmentů. Pryžové segmenty jsou uloženy mezi obručí a kotoučem s velkým předpětím, které je vyvoláno vlisováním přítlačného kroužku. [5]



Obr. č. 2.3: Základní uspořádání vypruženého kola [5]

## 2.2 Ložisková komora a primární vypružení

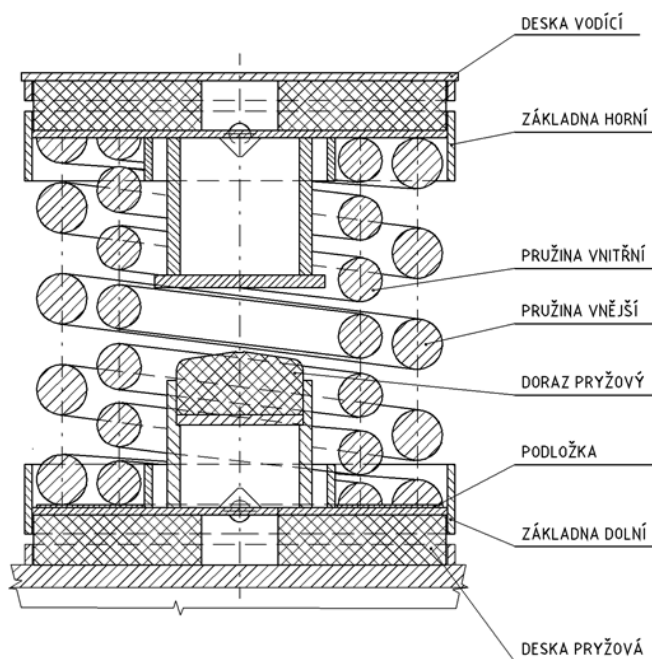
Na koncích nápravy jsou nalisována dvouřadá kuželová valivá ložiska. Ta jsou umístěna v ložiskové komoře. Ložisková skříň pak má na svých bocích vytvořené místo pro pryžokovové pružící prvky primárního vypružení. [5]



Obr. č. 2.4: Pohled na konstrukční uspořádání ložiskového domku [5]

## 2.3 Sekundární vypružení a hydraulický tlumič

Skříň tramvaje je proti podvozkům odpružena dvěma páry sad ocelových šroubových pružin. Sada je tvořena jednou vnitřní a jednou vnější pružinou se souhlasným směrem stoupání. V rámu podvozku jsou v jeho příčné ose vytvořena místa pro uložení pružin. Pružiny se na tato místa nekládají přímo, ale až po vložení pryžové desky do vedení přivařeném na rámu podvozku a dílu nazvaného dolní základna. Součástí dolní základny je pryžový doraz. Pohyby karosérie tramvaje proti podvozku tlumí dva páry tlumičů. Tlumiče jsou umístěné v příčné ose podvozků u bočnice. Upevňují se do držáků na spodku tramvaje a na podvozku. [5]



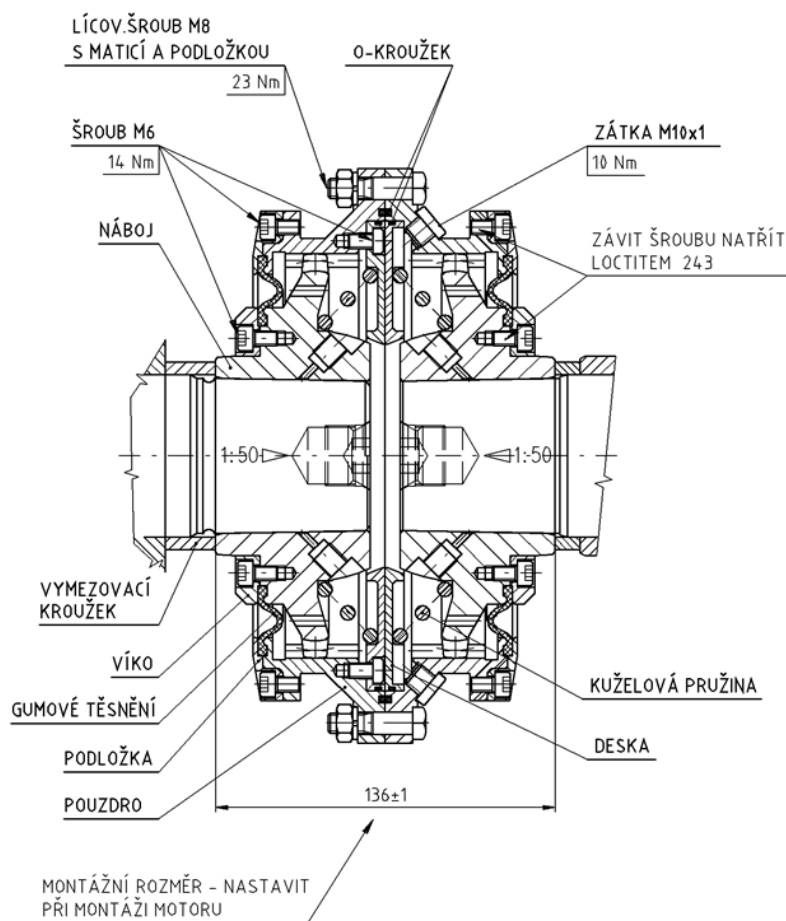
Obr. č. 2.5: Řez sekundárním vypružením [5]

## 2.4 Trakční motor

Trakční motor 2MLU 3436 K/4 je třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko a vinutím statoru spojeným do hvězdy uvnitř motoru, napájený z napěťového IGBT střídače. Motor je určen pro individuální pohon náprav nízkopodlažní tramvaje. Pro přenos krouticího momentu má motor jednostranně vyveden kuželový konec hřídele. Do podvozku je motor připevněn přes dvě patky. Motor je uzavřený, chladicí vzduch vystupuje z motoru axiálními kanály na straně vývodu hřídele, do motoru vstupuje axiálně na straně opačné. [5]

## 2.5 Zubová spojka

Zubová spojka přenáší krouticí moment vnějším ozubením s evolventním tvarem zubů na nábojích. Toto ozubení zabírá do vnitřního ozubení na pouzdru. Spojka je torzně tuhá. Spojka je dodávána na poloviny, které se po nalisování na hřídele spojí a spojka naplní olejem. [5]



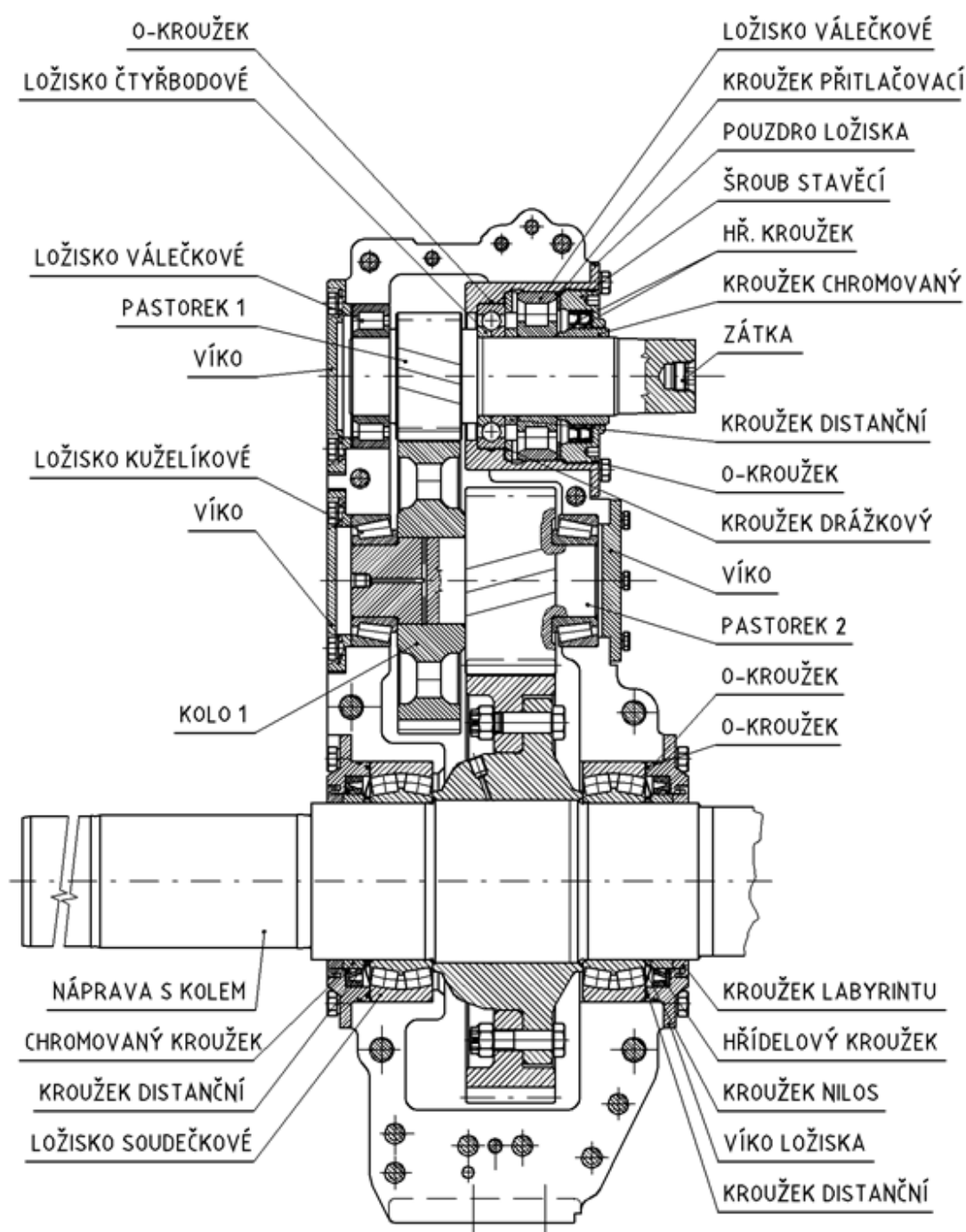
Obr. č. 2.6: Řez zubovou spojkou KWD – ZK 110-2 [5]

## 2.6 Nápravová převodovka

Převodovka slouží k přenosu výkonu mezi trakčním motorem a dvojkolím. Převod je do pomala s převodovým poměrem  $i = 6,84$ . Převod je tvořen dvěma páry čelních ozubených kol se šikmými zuby. Použitá jsou pouze valivá ložiska. Skříň převodovky je odlita z tvárné litiny. Je rozdělena vodorovně na dva díly. Horní a dolní. Dělicí rovina prochází nápravou a osami předlohového a vstupního hřídele, které jsou s nápravou rovnoběžné. Mazání ložisek a ozubení je provedeno olejem, kterým je převodovka naplněna. Ve skříni převodovky jsou tři zátky. Nalévací, kontrolní

a magnetický vypouštěcí. Odvzdušňovač v horním dílu brání zvyšování tlaku olejových par ve skříni, a tím protlačování oleje přes těsnění.

Vstupní hřídel je utěsněn dvěma za sebou umístěnými hřídelovými kroužky pro vysoké rychlosti. Vnější kroužek je s prachovkou. Výstupní hřídel – náprava je utěsněna hřídelovými kroužky s prachovkou. Dělicí rovina skříně převodovky je těsněna tmelem. Na skříni převodovky je vytvořena konzola pro namontování kotoučové brzdy a příprava pro závěsku, která připevněním k rámu podvozku zachycuje reakční moment převodovky. V horním dílu je zátkou zaslepená díra pro případné namontování čidla rychloměru. [5]



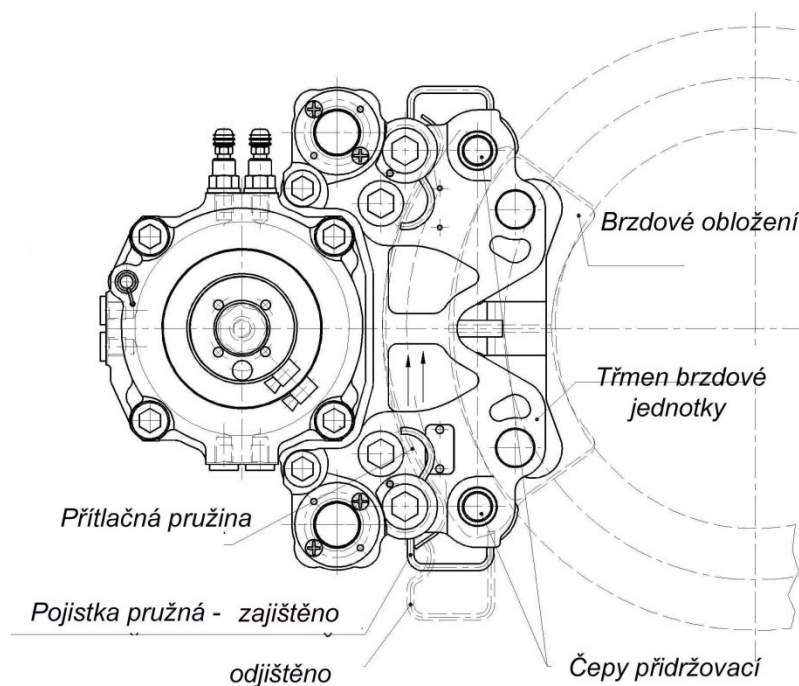
Obr. č. 2.7: Řez nápravovou převodovkou [5]

## 2.7 Brzdové zařízení

### - Kotoučová brzda

U brzdové jednotky se jedná o konstrukci, která se vyznačuje následujícími znaky [5]:

- plovoucí uložení brzdové jednotky
- pákový mechanismus pro přenos brzdné síly ze střadače na brzdové obložení
- přitlačná síla pružinového střadače
- automatické seřizování podle opotřebení, integrované do střadače
- pomocné hydraulické zařízení pro odbrzdění
- mechanické nouzové odbrzdění
- rychlá a jednoduchá výměna brzdových destiček vysunutím jen jednoho čepového držáku brzdových destiček
- kompaktní konstrukce
- všechna ložiska zapouzdřená, žádné domazávání



Obr. č. 2.8: Brzdová jednotka kotoučové brzdy KNORR – BREMSE [5]

### - Kolejnicová brzda

Je používána jako záchranná (nouzová) brzda. Kolejnicová brzda je umístěna okolo příčné osy podvozku. Z vnějšku na podélných nosnících jsou opěrné plochy pro rozsochy a držáky zavěšení kolejnicové brzdy. [5]

## 2.8 Pískovací a mazací zařízení

- Pískovací zařízení

Pro lepší adhezní podmínky ve zhoršených povětrnostních podmínkách je využito gravitačního pískovacího zařízení. Pískování se provádí před první a třetí nápravu. Pro pískování se využívá suchého křemičitého písku. Ten je umístěn v zásobnících uvnitř vozidla a pomocí hadice je přiváděn před nápravy. [5]

- Mazací zařízení

Díky tomu, že podvozky nejsou otočné, nutné zavést mazání okolků první a třetí nápravy. Mazání je prováděno tyčinkami tuhého maziva, vloženými do aplikátorů. Ty jsou namontovány na držáky na konzolách zavěšení kolejnicových brzd.



### 3 Systémy preventivní údržby

Udržovací systém tramvaje je výrobcem doporučený sled stupňů údržby, který je předpokladem bezpečného a bezporuchového provozu po dobu předpokládané životnosti tramvaje. [5]

Udržovací systém tvoří periodicky se opakující prohlídky a opravy:

DO	denní ošetření	denně (před výjezdem tramvaje na trať)
KP	kontrolní prohlídka	10 000 km $\pm$ 20%
SO	střední oprava	200 000 km $\pm$ 20%
VO	velká oprava	600 000 km $\pm$ 20%
GO	generální oprava	1 200 000 km $\pm$ 20%

O údržbě každého vozidla je vhodné vést záznamy nejen podle platných předpisů, ale zajistit takové záznamy, na jejichž základě je možné dále zpřesnit a zkvalitňovat technologii údržby.

Rámcová náplň práce jednotlivých stupňů údržby podvozků je popsána v následujících podkapitolách.

#### 3.1 Denní ošetření (denně před výjezdem tramvaje na trať)

Tento základní stupeň údržby má odhalit vady vzniklé v provozu předchozího dne, případně po delší odstávce zkontrolovat a zajistit připravenost tramvaje k bezvadnému provozu bezprostředně následujícímu. Prohlídka se provádí vizuálně. Prověří se hlášení diagnostiky a vezme se v úvahu záznam řidiče o technickém stavu z předchozího provozu. [5]

Zkontrolují se a dle potřeby se doplní provozní hmoty a předepsané vybavení. Odstraní se zjištěné závady a vymění se poškozené díly, které by mohly způsobit poruchu, zejména ty, které by mohly ohrozit bezpečnost.

### **3.2 Kontrolní prohlídka (10 000 km $\pm$ 20%)**

Kontrolní prohlídka není již jen optickou kontrolou zařízení, ale vyhledává a kontroluje se zde také opotřebení. Provádí se seřízení, zkouší se správná funkce, provádí se kontrolní měření apod. Zjištěná poškození se opraví a opotřebované díly se vymění. [5]

Při prohlídce podvozků překontrolujeme stav kol a uzemňovacích propojek. Podle profilu kol se rozhodne o jeho obnově nebo výměně obruče, případně o obrácení podvozku. Provedeme kontrolu rámu a nárazek příčného vedení skříně v podvozku, zavěšení kolejnicových brzd a trakčních motorů. Výška kolejnicových brzd a předpětí podélného vedení skříně v podvozku se seřídí. Zkontroluje se kotoučová brzda, stav kotouče a brzdových destiček, těsnost tlumičů, spojek a převodovek. Příčinu netěsnosti je třeba odstranit nebo příslušný díl vyměnit, zkontrolovat a upravit množství oleje. Zjistí se délka uhlíku nápravových sběračů, přezkouší se jejich volný pohyb a vyčistí se vnitřní prostor sběrače, případně i kontaktní nápravový kroužek. Pružiny primárního vypružení nesmí být nijak poškozeny. Zkontroluje se optický i sekundární stupeň vypružení a prověří se stav závěsu převodovky a lanových spojek mezi skříní a podvozkem. Průběžně se kontroluje i dotažení šroubových spojů.

### **3.3 Střední oprava (200 000 km $\pm$ 20%)**

Střední oprava rozšiřuje náplň předchozích stupňů údržby o výměny dílů se střední dobou životnosti. Započetím s opravami nebo obnovami antikorozní ochrany mají střední opravy zajistit nízké náklady na opravy konstrukci vozidla v budoucnu a dosažení předpokládané životnosti. [5]

Při střední opravě se vyváže podvozek. Důkladně se umyje, aby bylo možné kvalitně provést kontrolu všech dílů podvozků. V závislosti na stavu a opotřebení se díly demontují, vymění nebo se opraví. Podle průměru použitých kol se provede vypodložení pružin sekundárního vypružení, která vyrovná či sníží pokles skříně k zemi (výška nástupní hrany). Olejová náplň zubových spojek a trakčních převodovek se vymění. Měřením se překontroluje poloha vstupního hřídele převodovky a trakčního motoru a seřídí se dle potřeby závěs převodovky. Celý podvozek se ošetří novým antikorozním nátěrem a přezkouší při chodu naprázdno.

### **3.4 Velká oprava (600 000 km $\pm$ 20%)**

Při velké opravě se provede důkladná obnova antikorozní ochrany všech součástí vozidla se zvláštní pozorností na velmi namáhané díly partie spodku, podvozku a dutiny.

Demontuje se výzbroj a vyváže se podvozek. Díly podvozku a výzbroje se rozloží a po opravě nebo výměně vadných součástí se opět složí. Pečlivě se prozkoumá stav rámu, podvozku a náprav. Posoudí se také stav ložisek a ozubených kol v převodovkách, v případě nutnosti se vymění. [5]

### **3.5 Generální oprava (1 200 000 km $\pm$ 20%)**

Je to nejvyšší stupeň údržby, kde se vyváže podvozek a rozloží se na jednotlivé díly, včetně převodovky. Provede se odstranění ochranného nátěru rámu podvozku i případnou korozi. Očištěný rám podvozku se defektoskopicky prověří a provedou se nezbytné opravy. Veškeré nátěry povrchů, (včetně ošetření dutin) se provedou od základu zcela nově. Při zpětné montáži se použijí nové nebo rekonstruované díly. U nápravové převodovky se namontují vždy nová ložiska, těsnící kroužky a všechna ozubená kola. [5]

Generální oprava je příležitostí pro přípravu a provedení modernizace s použitím nových perspektivních výrobků, které mají lepší užitné vlastnosti nebo nahradí neperspektivní díly, které dosáhly své životnosti.

## 4 Výpočetní metody používané při prokazování spolehlivosti a predikce LCC

Hodnoty získané ze zkoušek spolehlivosti se porovnávají s některým ze zákonů rozdělení náhodné veličiny. Vhodnou volbou zákona rozdělení získáme racionální popis spolehlivostních vlastností zkoušeného výrobku. Zákon rozdělení se volí v souladu s průběhem získaných dat, např. podle tvaru histogramu četností a podle požadavků na shodu s danou charakteristikou. Zákon rozdělení s udanými parametry zcela popisuje charakteristiky spolehlivosti, a tudíž je možné výpočtem stanovit všechny další veličiny. Náhodnou veličinou může být např. doba provozu  $t$ , ujetá dráha  $l$  či jiný obdobný výkonový parametr.

### 4.1 Exponenciální rozdělení

Exponenciální rozdělení se používá pro popis doby do vzniku náhodného jevu (obvykle poruchy). Ve spolehlivosti je toto rozdělení vhodné pro systémy u nich náhodný jev vzniká náhle, bez opotřebení. Rozdělení má jen jeden parametr  $\lambda$  – intenzita poruch. [1]

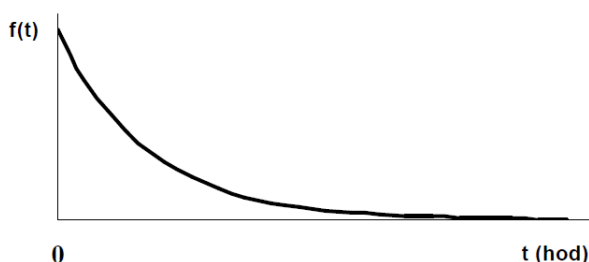
Hustota pravděpodobnosti  $f(t)$  je funkce, vyjadřující pravděpodobnost, že náhodná veličina  $T$  nabude hodnoty z nekonečně malého intervalu  $dt$ . U exponenciálního rozdělení má průběh klesající exponenciální funkce a je dána vztahem:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad [-] \qquad \lambda > 0, t \geq 0 \qquad (4.1)$$

Kde:

$t$  – hodnota náhodné veličiny  $T$  [h],

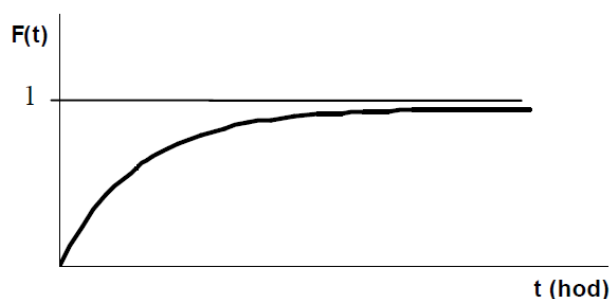
$\lambda$  – intenzita poruch [ $\text{h}^{-1}$ ].



Obr. č. 4.1: Průběh hustoty pravděpodobnosti [2]

Distribuční funkce  $F(t)$  je funkce vyjadřující pravděpodobnost, že náhodná veličina  $T$  nabude hodnoty menší nebo rovné, než je zadaná hodnota  $t$ . Distribuční funkce je dána vztahem:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} dt = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad [-] \quad \lambda > 0, t \geq 0 \quad (4.2)$$

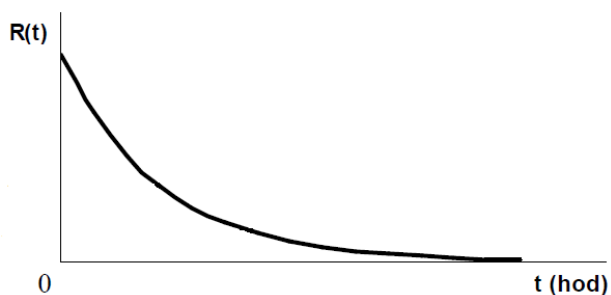


Obr. č. 4.2: Průběh distribuční funkce [2]

Pravděpodobnost bezporuchovosti  $R(t)$  vychází ze základních vlastností pravděpodobnosti a je dána vztahem:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad [-] \quad \lambda > 0, t \geq 0 \quad (4.3)$$

Pravděpodobnost bezporuchovosti  $R(t)$  je také nazývána jako funkce spolehlivosti. Má tvar klesající exponenciály.



Obr. č. 4.3: Průběh bezporuchovosti [2]

Střední doba do poruchy u exponenciálního rozdělení je rovna převrácené hodnotě parametru  $\lambda$ , a proto je rozdělení zcela popsáno také střední dobou.

Střední hodnota  $T_s$  je dána vztahem:

$$T_s = \frac{1}{\lambda} \quad [\text{h}] \quad (4.4)$$

Intenzita poruch  $\lambda(t)$  je dána vztahem:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}}{e^{-\lambda \cdot t}} = \lambda = \text{konst.} \quad [\text{h}^{-1}] \quad \lambda > 0, t \geq 0 \quad (4.5)$$

### Odhad parametru metodou lineární regrese

Odhad parametru rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny s využitím lineární regrese metodou nejmenších čtverců vychází z předpokladu, že souborem dat je proložena přímka tak, aby součet čtverců vzdálenosti mezi body a přímkou byl minimální. [1]

Věrohodnost teoretického modelu nalezeného metou lineární regrese udává index determinace  $R^2$ . Může nabývat hodnot z intervalu  $<0;1>$ , přičemž platí, že čím se hodnota blíží jedné, tím více soubor dat přiléhá k přímce a navržený model data dobře vystihuje. V opačném případě že index determinace se blíží k nule, pak navržený model není vhodný pro daná data, nebo se rozdělení pravděpodobnosti neřídí žádným zákonem a data jsou chaotická.

Postup pro odhad parametru  $\lambda$ :

- a) distribuční funkce exponenciálního rozdělení je dána vztahem (4.2), cílem naznačených úprav je získat takový tvar rovnice jako je tvar rovnice přímky:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

$$1 - F(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\ln[1 - F(t)] = -\lambda \cdot t$$

$$-\ln[1 - F(t)] = \lambda \cdot t \quad \text{rovnice přímky:} \quad y = k \cdot x + q$$

zavedeme substituce:

$$y = -\ln[1 - F(t)] \quad (4.6)$$

$$k \cdot x = \lambda \cdot t \quad (4.7)$$

$$q = 0 \quad (4.8)$$

- b) uspořádáme empirická data vzestupně, kde nejmenší hodnota (nejkratší doba do poruchy) obdrží pořadové číslo 1, druhá hodnota obdrží pořadové číslo 2, až poslední obdrží pořadové číslo  $n$ . Pořadové číslo  $n_i$  využijeme k odhadu mediánového pořadí  $F_i(m)$  dle vztahu:

$$F_i(m) = \frac{n_i - 0,3}{n + 0,4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

Kde:

$n_i$  - pořadové číslo poruchy

$n$  - celkový počet poruch

Mediánové pořadí je nejlepší odhad hodnoty  $F(t)$ , která vystupuje na pravé straně vztahu (4.6).

- c) sestrojíme bodový graf  $[F_i(m); y]$ , hodnotu  $F_i(m)$  vypočítáme ze vztahu (4.9) a hodnotu  $y$  ze vztahu (4.6),
- d) vzniklými body v grafu proložíme přímkou metodou nejmenších čtverců. Získanou rovnici přímky použijeme k odhadu parametru  $\lambda$ ,
- e) rovnici přímky porovnáme se vztahy (4.7 a 4.8). Směrnici přímky  $k$  odpovídá hodnota intenzity poruch  $\lambda$ ,
- f) provést zhodnocení vhodnosti modelů, pomocí hodnoty determinace  $R^2$ .

## 4.2 Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení se ve spolehlivosti velmi často využívá k modelování průběhu náhodné veličiny. Je velmi variabilní a této vlastnosti se s velkou výhodou využívá při posuzování bezporuchovosti technických objektů. Změnou parametru tvaru „nahrazuje“ i jiné zákony rozdělení jako např. exponenciální, aproximuje normální rozdělení. Pracujeme tak pouze s jedním tvarem rovnic, tudíž nemusíme používat rovnice pro další typy rozdělení. Tento způsob nahrazení několika rovnic jednou rovnicí je velmi výhodný při numerických výpočtech v prostředí tabulkového procesoru. [2]

Původně bylo Weibullovo rozdělení odvozeno jako tříparametrické, ale pro běžné výpočty se vztahy výrazně zjednodušují převedením na dvouparametrické. Označuje se  $W_3P$  resp.  $W_2P$ . Položením parametru  $c = 0$  vzniká  $W_2P$  rozdělení.

Hustota pravděpodobnosti  $f(t)$  u  $W_2P$  rozdělení je dána vztahem:

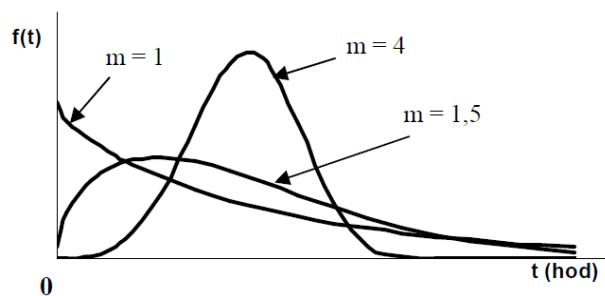
$$f(t) = \frac{m}{t_o} \cdot \left(\frac{t}{t_o}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_o}\right)^m} \quad [-] \quad t \geq 0, t_o > 0, m > 0 \quad (4.10)$$

Kde:

$t$  - hodnota náhodné veličiny  $T$  [h]

$m$  - parametr tvaru [-]

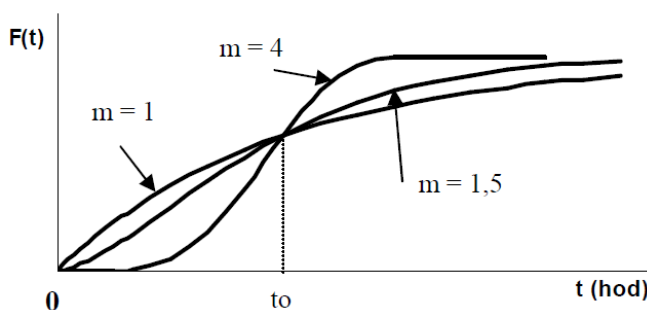
$t_o$  - parametr měřítka [h]



Obr. č. 4.4: Průběh hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty parametru tvaru [2]

Distribuční funkce  $F(t)$  je dána vztahem:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_o}\right)^m} \quad [-] \quad t \geq 0, t_o > 0, m > 0 \quad (4.11)$$



Obr. č. 4.5: Průběh distribuční funkce pro různé hodnoty parametru tvaru [2]

Průsečík průběhu křivek se nazývá „charakteristický život“, pro který platí  $t = t_o$ .

Pravděpodobnost bezporuchovosti  $R(t)$  je následně dána vztahem:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_o}\right)^m} \quad [-] \quad t \geq 0, t_o > 0, m > 0 \quad (4.12)$$

Střední hodnota  $T_s$  je dána vztahem:

$$T_s = t_o \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad [\text{h}] \quad t_o > 0, m > 0 \quad (4.13)$$

kde:

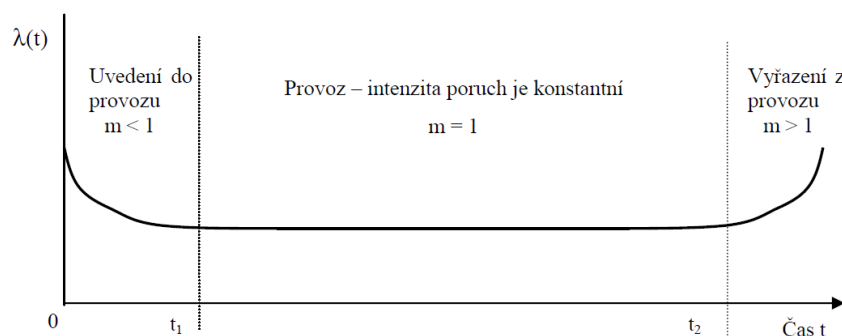
$\Gamma$  - gama funkce (tabelovaná)

Intenzita poruch  $\lambda(t)$  je dána vztahem:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{m}{t_o} \left(\frac{t}{t_o}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_o}\right)^m}}{e^{-\left(\frac{t}{t_o}\right)^m}} = \frac{m}{t_o} \cdot \left(\frac{t}{t_o}\right)^{m-1} \quad [\text{h}^{-1}] \quad t \geq 0, t_o > 0, m > 0 \quad (4.14)$$



Průběh intenzity poruch je závislý na hodnotě parametru tvaru  $m$ . Jehož změnou lze vyjádřit intenzitu poruch v různých fázích životního cyklu.



Obr. č. 4.6: Intenzita poruch u Weibullova rozdělení [2]

#### Odhad parametrů metodou lineární regrese

Obdobně jako u odhadu parametru exponenciálního rozdělení využijeme i u Weibullova rozdělení metodu lineární regrese. Odvození a postup bude nyní znázorněn v několika krocích [2]:

- a) distribuční funkce  $W_2P$  rozdělení je dána vztahem (4.11). Cílem následných uprav je získat tvar vhodný k zavedení substituce rovnicí přímky:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)^m}$$

$$\ln[1 - F(t)] = -\left(\frac{t}{t_0}\right)^m$$

$$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = m \cdot \ln t - m \cdot \ln t_0 \quad \text{rovnice přímky: } y = k \cdot x + q$$

zavedeme substituce:

$$y = \ln\{-\ln[1 - F(t)]\} \quad (4.15)$$

$$k \cdot x = m \cdot \ln t \quad (4.16)$$

$$q = -m \cdot \ln t_0 \quad (4.17)$$

- b) uspořádáme empirická data vzestupně, kde nejmenší hodnota (nejkratší doba do poruchy) obdrží pořadové číslo 1, druhá hodnota obdrží pořadové číslo 2, až poslední obdrží pořadové číslo  $n$ . Pořadové číslo  $n_i$  využijeme k odhadu mediánového pořadí  $F_i(m)$  dle vztahu:

$$F_i(m) = \frac{n_i - 0,3}{n + 0,4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.18)$$

Kde:

$n_i$  - pořadové číslo poruchy

$n$  - celkový počet poruch

Mediánové pořadí je nejlepší odhad hodnoty  $F(t)$ , která vystupuje na pravé straně vztahu (4.15).

- c) sestojíme bodový graf o souřadnicích  $[\ln t_i; y_i]$ , hodnota  $y_i$  se vypočítá ze vztahu (4.15). Vzniklými body v grafu proložíme přímkou metodou nejmenších čtverců, s výhodou lze pro tuto operaci použít vestavěné funkce tabulkového procesoru. Získanou rovnici přímky použijeme k odhadu parametru  $W_2P$  rozdělení,
- d) rovnici přímky porovnáme se vztahy (4.16, 4.17). Směrnice přímky  $k$  odpovídá hodnotě parametru tvaru  $m$ , parametr měřítka  $t_o$  vypočítáme úpravou vztahu (4.17):

$$q = -m \cdot \ln t_o$$

$$\ln t_o = -\frac{q}{m}$$

$$t_o = e^{-\left(\frac{q}{m}\right)} \quad (4.19)$$

- e) provést zhodnocení vhodnosti modelů, pomocí hodnoty determinace  $R^2$ , případně provést test dobré shody.

### 4.3 Test dobré shody Kolmogorov – Smirnov

Test dobré shody se používá k testování matematické hypotézy, jejichž obsahem je zkoumání tvaru rozdělení zkoumané náhodné veličiny. Vedle velmi dobře známého testu dobré shody  $\chi^2$ , který je určen pro odhady parametrů rozdělení, jestliže máme větší množství vstupních dat. Pokud však máme nízký počet vstupních dat (nejméně však 5 záznamů) je vhodné použít test dobré shody, který je pojmenovaný podle jejích autorů, a to test dobré shody Kolmogorov – Smirnov. Pro potřeby diplomové práce bude

dostatečně stačit jedno výběrový test dobré shody. Pro test jednoho výběru se nejprve určí nulová hypotéza a k ní hypotéza alternativní. Často se hypotézy interpretují ve tvaru:

Nulová hypotéza  $H_0$ : rozdělení náhodné veličiny je dáno distribuční funkcí  $F_0(x)$ .  
Alternativní hypotéza  $H_1$ : rozdělení náhodné veličiny není dáno distribuční funkcí  $F_0(x)$ .

Při testování náhodné veličiny postupujeme podle následujících kroků:

- 1) určíme distribuční funkci rozdělení výběru náhodné veličiny ze vstupních dat  
Tento krok provedeme podle vztahu (4.18).
- 2) z odhadu parametrů rozdělení vypočteme teoretickou hodnotu distribuční funkce
- 3) definujeme nulovou hypotézu  $H_0$ : distribuční funkce rozdělení náhodné veličiny výběru odpovídá teoretickému rozdělení s danými parametry. Alternativní hypotéza  $H_1$  je negací  $H_0$
- 4) vypočítáme testovací kritérium podle vztahu:

$$D = \sup |F_i(m) - F(l_i)| \quad (4.20)$$

kde  $D_1$  je testovací kritérium,  $F_i(m)$  je hodnota mediánového pořadí, která nahrazuje distribuční funkci,  $F_i$  je hodnota teoretické distribuční funkce

- 5) z tabulky (viz příloha A) určíme hodnotu kritické hodnoty testu  $D_{n; 1-\alpha}$  (kde  $\alpha$  je hladina významnosti) pro testovací kritérium podle počtu prvků testovaného souboru
- 6) porovnáme testovací kritérium s kritickou hodnotou. Můžeme získat dva možné výsledky:

$$D < D_{n; 1-\alpha} \quad \text{pro tento výsledek nezamítáme } H_0 \quad (4.21)$$

$$D \geq D_{n; 1-\alpha} \quad \text{pro tento výsledek zamítáme } H_0 \text{ a přijímáme } H_1 \quad (4.22)$$

#### 4.4 Analýza stromu poruchových stavů (FTA)

Analýza stromu poruchových stavů je efektivní analytická metoda pro posouzení možných rizik složitějších systémů. FTA je založena na analýze vrcholové události (TOP), tj. negativní nežádoucí jev, kde identifikujeme možné faktory vedoucí k této vrcholové události.

Cílem analýzy je nalezení příčin a jejich kombinací vedoucích k vrcholové události a následnému využití informací ke zlepšení procesů a snížení pravděpodobnosti výskytu poruch v analyzovaných systémech. Jednotlivým událostem lze přidělit pravděpodobnost

jejich výskytu, a tak lze identifikovat kritická místa v analyzovaném systému. U analýzy postupujeme od vrcholové události směrem k základním procesům.

Grafickou reprezentací analýzy FTA je strom poruchových stavů. Jedná se o organizovanou strukturu podmínek a faktorů způsobujících nebo přispívajících k výskytu vrcholové události. Strom poruch je zobrazován diagramem znázorňujícím logické vztahy mezi vrcholovou události a primární příčinou jejího vzniku. Strom poruch znázorní logický vývoj poruchy v systému a odhalí vazby mezi prvky systému. Jednotlivé součásti stromu poruchových stavu jsou:

- hradla (logický součet OR, logický součin AND, majoritní hradlo m/n)
- události (nejnižší úroveň vstupu)
- ostatní grafické součásti (spojovací čáry, popisy mezilehlých události, značky hradel, značky primárních události, ...)

#### Hradlo logického součtu OR

Hradlo OR se používá v takovém případě větvení poruch, kdy platí, že porucha na výstupu nastane tehdy, když nastane porucha na kterémkoliv vstupním prvku.



Obr. č. 4.7: Zobrazení hradla OR

**Tab. č. 4.1: Pravdivostní tabulka hradlo OR**

A	B	Výs.
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Výslednou pravděpodobnost výskytu poruchy na výstupu z hradla OR lze vyjádřit vztahem:

$$F_{OR} = 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)] \quad (4.23)$$

Kde:

$F_{OR}$  – pravděpodobnost výskytu poruchy na výstupu z hradla OR

$R_i$  – pravděpodobnost bezporuchového stavu i-tého vstupního prvku do hradla OR

### Hradlo logického součinu AND

Hradlo AND se používá v takovém případě větvení poruch, kdy platí, že porucha na výstupu nastane tehdy, když současně nastanou poruchy na všech vstupních prvcích.



Obr. č. 4.8: Zobrazení hradla AND

Tab. č. 4.2: Pravdivostní tabulka hradlo AND

A	B	Výs.
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Výslednou pravděpodobnost výskytu poruchy na výstupu z hradla OR lze vyjádřit vztahem:

$$F_{AND} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot \dots \cdot F_n \quad (4.24)$$

Kde:

$F_{AND}$  – pravděpodobnost výskytu poruchy na výstupu z hradla AND

$F_i$  – pravděpodobnost poruchy i-tého vstupního prvku do hradla AND

## 4.5 Náklady životního cyklu LCC

Ekonomický tlak působící v důsledku velkého konkurenčního prostředí mezi výrobci kolejových vozidel vede management společností k nutnosti nahlížet na problematiku hospodaření s vozidly z dlouhodobého hlediska. Posuzují se náklady spojené s pořízením samotného vozidla, jeho provozem, opravami, údržbou, i likvidací. Nutnost hledání ekonomických úspor vedlo výrobce a provozovatele vozidel zpracovat a analyzovat životní cyklus na jednotlivé etapy. Etapy představují logický navazující oblasti.

Základní podmínky hodnocení LCC:

- orientační doba provozu vozidla delší než jeden rok
- náklady na pořízení vozidla představují menší část celkových nákladu na vozidlo

#### Etapy a náklady životního cyklu vozidla

Pro výrobce, ale taktéž pro uživatele je důležité stanovit, ve které etapě se výrobek (vozidlo) nachází. Je proto nutné použít exaktní metody stanovení etap životního cyklu vozidla, které vycházejí ze sledování a hodnocení změn některých jakostních parametrů, např. průběhu intenzity poruch. Předčasná nebo opožděná likvidace vozidla má vždy za následek ekonomické, případně velké hmotné ztráty. [2]

Život vozidla (nebo jeho části) lze rozdělit na několik etap:

- |   |   |  |
|---|---|--|
| 1. etapa koncepce a stanovení požadavků | } | vzniká inherentní<br>(vložená)spolehlivost |
| 2. etapa návrhu a vývoje                |   |  |
| 3. etapa výroby                         |   |  |
| 4. etapa uvedení do provozu             | } | využívá se<br>inherentní                   |
| 5. etapa provozu                        |   |  |
| 6. etapa likvidace                      |   |  |

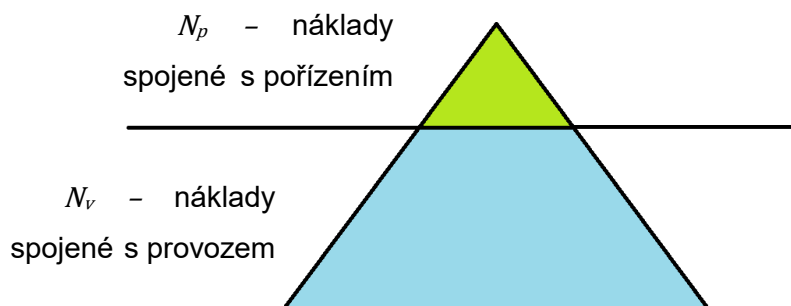
Náklady životního cyklu tvoří:

$$LCC = N_p + N_v \quad (4.25)$$

Kde:

$N_p$  - pořizovací náklady vlastníka vozidla (cena vozidla), jsou tvořeny náklady na 1.až 4. etapu. Lze je vyhodnotit před rozhodnutím o pořízení vozidla

$N_v$  - vlastnické náklady jsou tvořeny náklady na provoz, údržbu, opravy a likvidaci vozidla. Tvoří hlavní skupinu nákladových položek LCC, nejsou však tak dobře „viditelné“, obtížně se odhadují. Náklady nese uživatel vozidla



Obr. č. 4.9: Ilustrace dělby nákladu

Odhad LCC se provádí rozdělením na jednotlivé nákladové položky. Při odhadu položek se systematicky postupuje v těchto krocích:

- a) rozčlenění vozidla na konstrukční části, skupiny, podskupiny, součásti
- b) rozčlenění na jednotlivé etapy životního cyklu, tj. na doby životního cyklu, kdy se má práce, činnost provést
- c) zařazení nákladů do kategorií, tj. např. náklady na pracovní sílu, materiál, energie, režie
- d) sestavení a posouzení různých variant uspořádání vozidla, vyhodnocením je například ovlivněno rozhodnutí nakoupit díl, nebo sami díl vyrobit

Současný údržbový systém vozidel je preventivní a respektuje průběh opotřebení části vozidla i jeho celek. V okamžiku uvedení vozidla do provozu jsou mechanické díly ve výrobních rozměrech a opotřebení je nulové. Tomu odpovídá po odeznění záběhové fáze snížena intenzita poruch  $\lambda(t)$ , s dobou provozu však roste v důsledku zvětšujícího se opotřebení. Po uplynutí určité doby provozu je dosaženo např. kilometrického proběhu a celek nebo část vozidla musí být opravena a uvedena zpět do výrobních rozměrů, jsou odstraněny následky opotřebení. Opravy, někdy spojené s modernizací vozidla, mají často za následek krátkodobé zvýšení intenzity poruch. Situaci popsanou výše můžeme znázornit Vanovou křivkou. [2]

## 5 Posouzení provozní spolehlivosti konstrukčních celku podvozku tramvaje

Při posuzování spolehlivosti je zapotřebí získat data o poruchách podvozku tramvaje INEKON TRIO 2001. V tomto případě pod pojmem data jde o kilometrický proběh tramvaje při poruše. Data o poruchách jsem získal z informačního systému údržby, který vlastní Dopravní podnik Ostrava, a.s. Úkolem je vybrat z informačního systému pouze taková data, které jsou spjata s podvozkem tramvaje INEKON TRIO 2001. Vybraná data jsem zařadil do příslušných konstrukčních skupin jako jsou:

- pískovací a mazací zařízení
- brzdové zařízení
- trakční pohon
- náprava, kola, vypružení
- rám podvozku

Dále je nutné určit zákon rozdělení pravděpodobnosti a jeho parametry v jednotlivých konstrukčních skupinách na základě získaných dat. Z logiky řešeného problému víme, že se bude jednat o spojitě rozdělení pravděpodobnosti. V tomto případě předpokládáme, že využijeme především Weibullovo rozdělení případně Exponenciální rozdělení.

### 5.1 Odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti konstrukčních celku

Pro vzorové řešení odhadu parametrů rozdělení pravděpodobnosti využijeme tabulkový procesor Excel. Následně výsledek odhadu porovnáme s výsledkem odhadu ze softwaru WEIBULL ++. Porovnáním si ověříme správnost postupu a nastavení SW. Pro další konstrukční skupiny pak využijeme SW WEIBULL ++, který je určený pro výpočty z oblasti RAMS.

Pro odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti se využívají nejčastěji dvě metody:

- metoda lineární regrese
- metoda maximální věrohodnosti

Vzorové řešení je provedeno pro konstrukční skupinu pískovací a mazací zařízení. Na základě vstupních dat patřících k této konstrukční skupině předpokládáme, že se bude jednat o dvouparametrické Weibullovo rozdělení (variabilní typ rozdělení). Vhodnost vybraného typu rozdělení pak vyhodnotíme podle hodnoty korelace  $R^2$ .



Aby mohl být výsledek považován za uspokojivý, musí se hodnota  $R^2$  nacházet v intervalu  $<0,9; 1>$ . Při odhadu parametrů Weibullova rozdělení využijeme metodu lineární regrese.

### 5.1.1 Lineární regrese pískovací a mazací zařízení – Excel

Vzhledem ke značné rozsáhlosti výpočtů, které jsou shodné, budou zde uvedeny pouze vzorové výpočty pro ověření správnosti výpočtu. Vzorové výpočty se budou týkat první hodnoty kilometrického proběhu do poruchy. Výpočet pro ostatní hodnoty jsou provedeny podle stejného vzorce s dosazením příslušných hodnot. Pod vzorovým výpočtem se nachází tabulka s hodnotami pro prvních pět poruch.

Prvním krokem je seřadit data ujetých vzdáleností do poruchy podle velikosti vzestupně a následně danému kilometrickému proběhu do poruchy přiřadit pořadové číslo. Celkový počet poruch zařazených do konstrukční skupiny pískovací a mazací zařízení je 39. Následně určíme hodnotu mediánového pořadí  $F_i(m)$  podle vztahu (4.18):

$$F_i(m) = \frac{n_i - 0,3}{n + 0,4}$$

$$F_1(m) = \frac{1 - 0,3}{39 + 0,4} = 0,0177665$$

**Tab. č. 5.1: Příklad výpočtu mediánového pořadí, nahrazující hodnotu distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti**

p.č. poruchy $i$	$l_i$ [km]	$F_i(m)$
1	19 080	0,0177665
2	21 936	0,0431472
3	35 962	0,0685279
4	40 614	0,0939086
5	42 339	0,1192893

Dalším krokem je zavedení substituce podle rovnic (4.15) a (4.16). Nejprve vypočteme přirozený logaritmus kilometrický proběh při poruše, který reprezentuje hodnoty na vodorovné ose:

$$\ln(l_1) = \ln(19\,080) = 9,8564$$

**Tab. č. 5.2: Příklad výpočtu přirozeného logaritmu kilometrického proběhu při poruše**

p.č. poruchy $i$	$l_i$ [km]	$F_i(m)$	$\ln(l_i)$
1	19 080	0,0177665	9,8564
2	21 936	0,0431472	9,99588
3	35 962	0,0685279	10,4902
4	40 614	0,0939086	10,6119
5	42 339	0,1192893	10,6535

Následně je vypočtena hodnota  $y$ , reprezentující hodnoty na svislé ose:

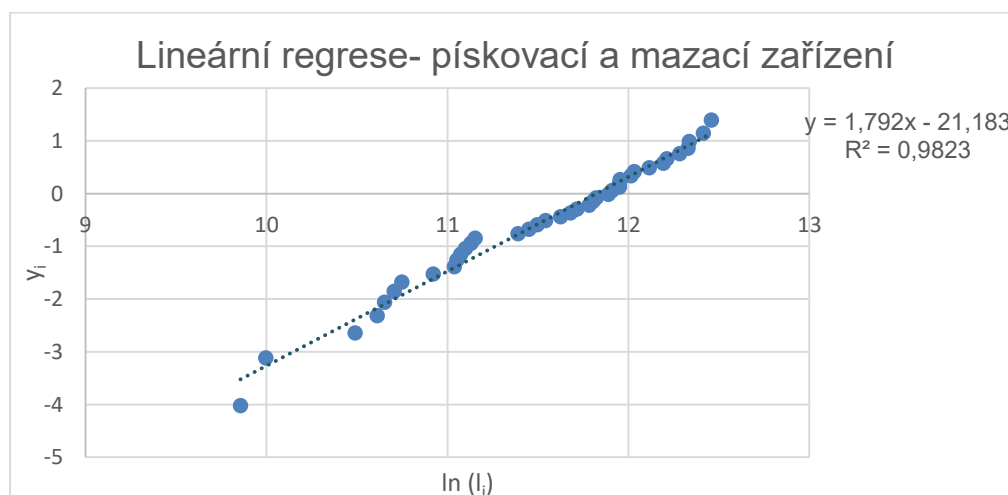
$$y_i = \ln\{-\ln[1 - F_i(m)]\}$$

$$y_1 = \ln\{-\ln[1 - 0,0177665]\} = -4,0215$$

**Tab. č. 5.3: Příklad výpočtu hodnoty  $y_i$**

p.č. poruchy $i$	$l_i$ [km]	$F_i(m)$	$\ln(l_i)$	$y_i$
1	19 080	0,0177665	9,8564	-4,0215
2	21 936	0,0431472	9,99588	-3,1212
3	35 962	0,0685279	10,4902	-2,6452
4	40 614	0,0939086	10,6119	-2,3165
5	42 339	0,1192893	10,6535	-2,0634

Nyní můžeme vytvořit bodový graf XY, kde na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty přirozeného logaritmu kilometrického proběhu při poruše a na svislé ose jsou vyneseny hodnoty substituce  $y_i$ . Dále vytvořeným bodovým grafem proložíme lineární spojnici trendu a vygenerujeme rovnici přímky a hodnotu korelace  $R^2$ .



**Obr. č. 5.1: Graf lineární regrese pískovacího a mazacího zařízení**

Z rovnice regresní přímky určíme a vypočteme parametry Weibullova rozdělení. Viz tab. č. 5.4:

- parametr tvaru Weibullova rozdělení pravděpodobnosti  $m$ . Tento parametr je roven směrnici regresní přímky,
- hodnotu  $-q$  je zapotřebí přepočítat na parametr měřítka  $t_0$  podle vztahu (4.19)

$$t_0 = e^{-\left(\frac{q}{m}\right)}$$

$$t_0 = e^{-\left(\frac{21,183}{1,792}\right)} = 136\,063 \text{ km}$$

**Tab. č. 5.4: Tabelární přehled parametrů pískovacího a mazacího zařízení**

n	39
m	1,792
$t_0$	136 063 km
$R^2$	0,9823

Na základě odhadu parametrů rozdělení pravděpodobnosti můžeme sestavit distribuční funkci a pravděpodobnostní funkci pískovacího a mazacího zařízení. Parametry dosazujeme do rovnic (4.10, 4.11):

$$F(l_1) = 1 - e^{-\left(\frac{l_1}{136063}\right)^{1,792}}$$

$$F(l_1) = 1 - e^{-\left(\frac{19\,080}{136063}\right)^{1,792}} = 0,0292$$

$$f(l_1) = \frac{1,792}{136\,063} \cdot \left(\frac{l_1}{136\,063}\right)^{1,792-1} \cdot e^{-\left(\frac{l_1}{136\,063}\right)^{1,792}}$$

$$f(l_1) = \frac{1,792}{136\,063} \cdot \left(\frac{19\,080}{136\,063}\right)^{1,792-1} \cdot e^{-\left(\frac{19\,080}{136\,063}\right)^{1,792}} = 2,698 \cdot 10^{-6}$$

Na závěr je ještě dobré provést test dobré shody, který potvrdí nebo vyvrátí věrohodnost odhadnutých parametrů rozdělení pravděpodobnosti na předem zvolené hladině významnosti. V této práci díky malému počtu vstupních dat je vhodné použít test dobré shody Kolmogorov – Smirnov, jehož postup je popsán v kapitole 4.3. V předchozích výpočtech byla vypočtena hodnota výběrové distribuční funkce  $F_i(m)$ , tak i hodnota teoretické distribuční funkce  $F(l_i)$ . Pro můžeme pokračovat výpočtem podle vztahu (4.20), kde je nejprve vypočítaná hodnota rozdílu hodnot distribučních funkcí v absolutní hodnotě.

$$\Delta F_1 = |F_1(m) - F(l_1)|$$

$$\Delta F_1 = |0,0177665 - 0,0291558| = 0,0113893$$

**Tab. č. 5.5: Výpočet rozdílu distribučních funkcí**

p.č. poruchy i	$l_i$ [Km]	$F_i(m)$	$F(l_i)$	$ \Delta F_i $
1	19 080	0,0177665	0,0291558	0,0113893
2	21 936	0,0431472	0,0372793	0,0058679
3	35 962	0,0685279	0,0880151	0,0194872
4	40 614	0,0939086	0,1082538	0,0143451
5	42 339	0,1192893	0,1161256	0,0031637

Následně je nalezeno maximum v takto uspořádaném výběru, které představuje hodnotu testovacího kritéria  $D$ . Pro vzorový případ je maximum nalezeno jako:

$$D = \sup (|\Delta F_i|)$$

Nakonec testovací kritérium porovnáme s kritickou hodnotou, kterou nalezneme v příloze A. Test je prováděn na hladině významnosti  $\alpha = 0,1$  a počtu stupňů volnosti 39, pak kritická hodnota testu je rovna  $D_{n; 1-\alpha} = 0,191$ .

Aby byla nulová hypotéza  $H_0$  nezamítnutá, je nutné splnit podmínku podle vztahu (4.21):

$$D < D_{n; 1-\alpha}$$

$$0,0865397 < 0,191$$

Z této nerovnice je patrné, že nulovou hypotézu nezamítáme. Lze tedy tvrdit, že s 90% pravděpodobností vstupním datům odpovídá zvolené rozdělení s příslušnými parametry definovanými v tab. č. 5.4.

### 5.1.2 Lineární regrese pískovací a mazací zařízení – WEIBULL++

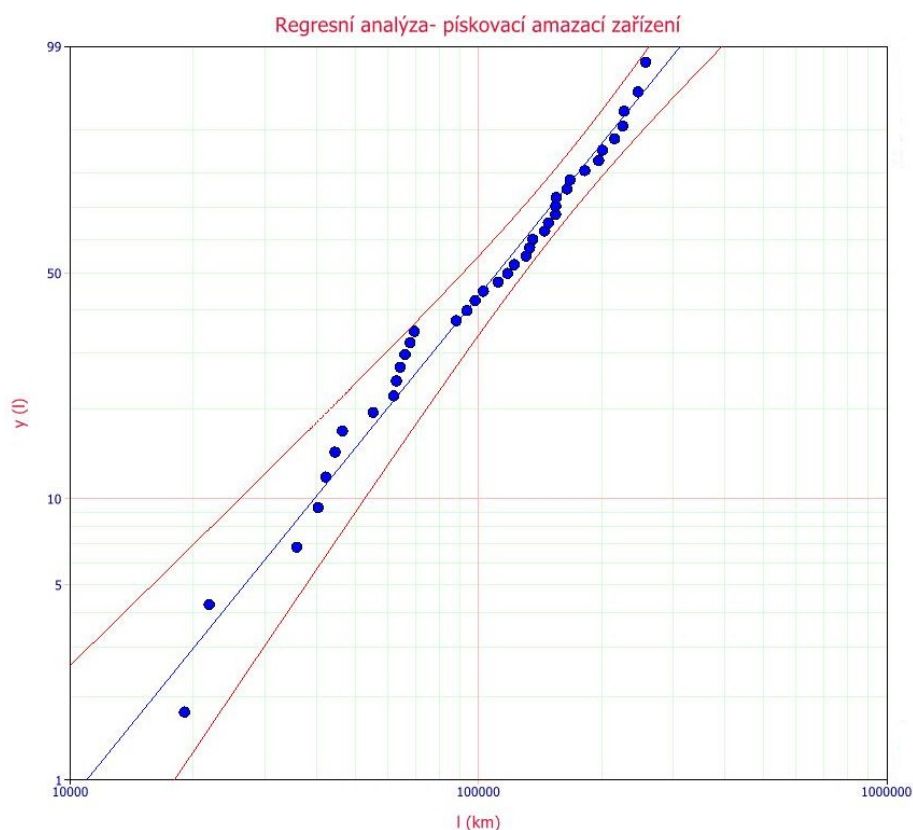
Abychom u dalších konstrukčních skupin nemuseli absolvovat zdlouhavý výpočet, kde by bylo možné udělat chybu, rozhodli jsme se použít pro další odhady parametrů rozdělení pravděpodobnosti SW WEIBULL ++ určený především pro odhady parametrů.

Odhady parametrů rozdělení pravděpodobnosti jsou v SW WEIBULL++ velice rychlé a proveditelné jen v několika málo krocích. Tyto kroky jsou:

- zkopírování vstupních dat do WEIBULL++
- zvolit zákon rozdělení pravděpodobnosti ( $W_3P$ ,  $W_2P$ ,  $Ex$ , ...)
- zvolit metodu odhadu parametrů (lineární regresi, metodu maximální věrohodnosti, ...)

- provést samotný výpočet
- zobrazení grafu
- zobrazení hranic konfidenční úrovně
- vyhodnocení vhodnosti vybraného typu zákona rozdělení pravděpodobnosti
- interpretace výsledku

Na následujícím obr. č. 5.2 je znázorněn graf lineární regrese se zobrazením hranic konfidenční úrovně  $C = 0,9$



Obr. č. 5.2: Graf lineární regrese pískovacího a mazacího zařízení SW WEIBULL++

Jelikož všechny body v předchozím obrázku se nacházejí mezi hranicemi konfidenční úrovně můžeme říct, že  $W_2P$  je vhodným zákonem rozdělení pravděpodobnosti popisující zadaná data. Výsledné parametry rozdělení jsou zapsané v následující tab. č. 5.6:

**Tab. č. 5.6: Tabelární přehled parametrů pískovacího a mazacího zařízení ze SW WEIBULL++**

$n^*$	39
$m^*$	1,829
$t_0^*$	135 314 km
$R^{2*}$	0,9911

### 5.1.3 Porovnání bodového odhadu z Excelu s výsledkem bodového odhadu ze softwaru WEIBULL ++

Abychom se ujistili, že postup v SW je správný, je zapotřebí porovnat výsledné hodnoty parametrů rozdělení obou předchozích postupu. Proto, abychom mohli prohlásit postupy za relevantní, neměly by se výsledné hodnoty od sebe příliš lišit. Výsledky obou postupů jsou zobrazeny v následujících tabulkách:

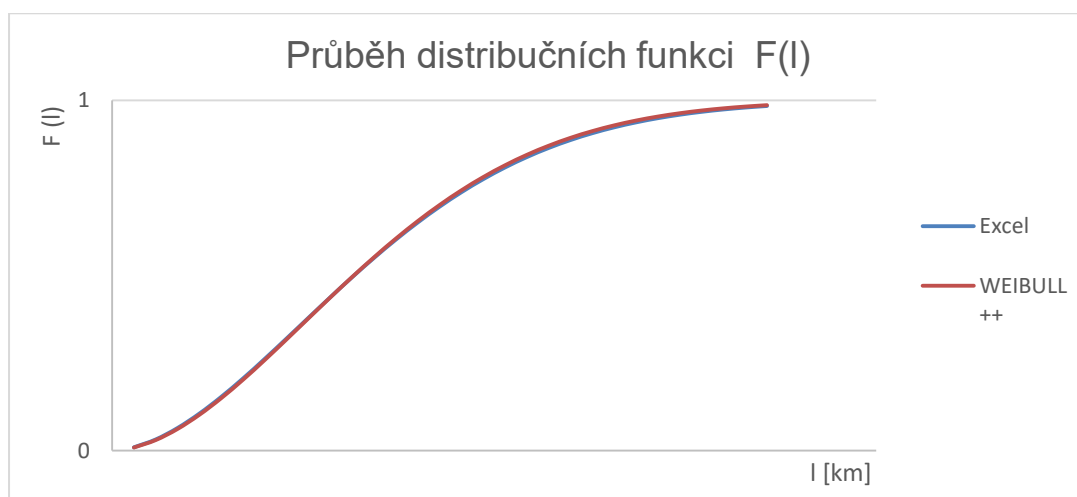
**Tab. č. 5.7: Výsledné hodnoty odhadu parametru pro postup v Excelu**

n	39
m	1,792
$t_0$	136 063 km
$R^2$	0,9823

**Tab. č. 5.8: Výsledné hodnoty odhadu parametru pro postup v SW WEIBULL++**

$n^*$	39
$m^*$	1,829
$t_0^*$	135 314 km
$R^{2*}$	0,9911

Při porovnání hodnot obou postupů je patrné, že jejich odchylky jsou velice minimální, tudíž je možné oba postupy prohlásit za relevantní. Toto tvrzení je možné dokázat na průbězích distribučních funkcí pro oba postupy, viz obr. č. 5.3:



**Obr. č. 5.3: Průběh distribučních funkcí  $F(l)$  obou postupu**

#### 5.1.4 Odhad parametrů rozdělení pravděpodobnosti ostatních konstrukčních skupin

V této části budou jen vypsány výsledky odhadu ostatních konstrukčních skupin. U konstrukční skupiny rám nebyly zjištěny žádné poruchy, tudíž není tato konstrukční skupina dále uvažována. Lineární regrese, případně metoda maximální věrohodnosti ostatních konstrukčních skupin, jsou k dispozici v příloze B-E této práce, kde jsou také průběhy distribučních funkcí, bezporuchovosti, hustoty pravděpodobnosti či intenzity poruch.

Téměř u všech konstrukčních skupin nejlépe vstupní data vystihuje dvoupamtrické Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti s parametrem tvaru  $m$  a parametrem měřítka  $t_0$ , kromě konstrukční skupiny kola a vypružení, kde nejlépe vstupní data vystihuje mixované Weibullovo rozdělení. Index \* v následných tabulkách znamená, že parametry pocházejí ze SW WEIBULL++.

Brzdové zařízení:

**Tab. č. 5.9: Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro brzdové zařízení**

$n^*$	19
$m^*$	1,198
$t_0^*$	255 255 km
$R^{2*}$	0,9813

Trakční pohon:

**Tab. č. 5.10: Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro trakční pohon**

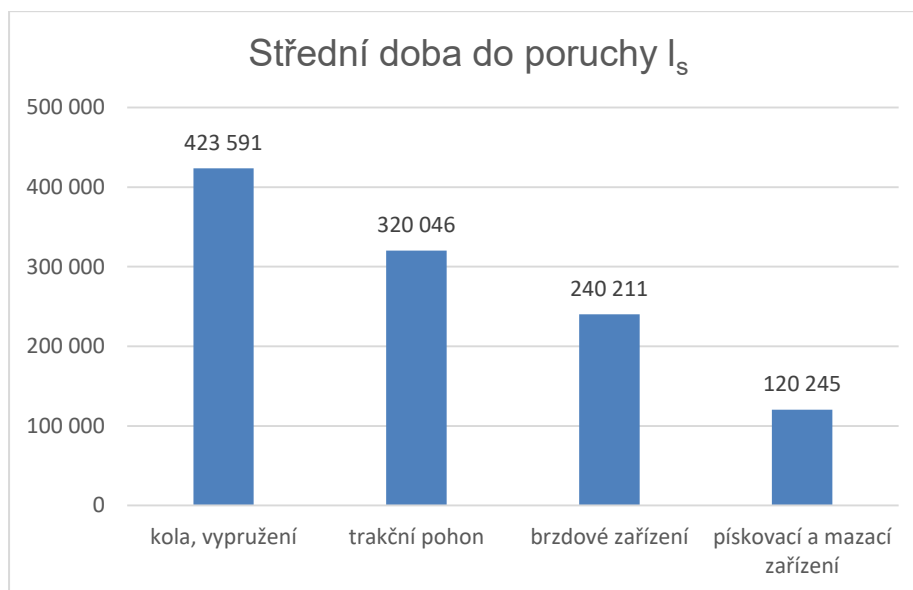
$n^*$	13
$m^*$	2,440
$t_0^*$	360 911 km
$R^{2*}$	0,9577

Kola a vypružení:

**Tab. č. 5.11: Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro kola a vypružení**

$n^*$	24
$m_1^*$	3,808
$t_{01}^*$	225 169 km
$P_1^*$	33,245 %
$m_2^*$	6,323
$t_{02}^*$	573 076 km
$P_2^*$	66,755 %

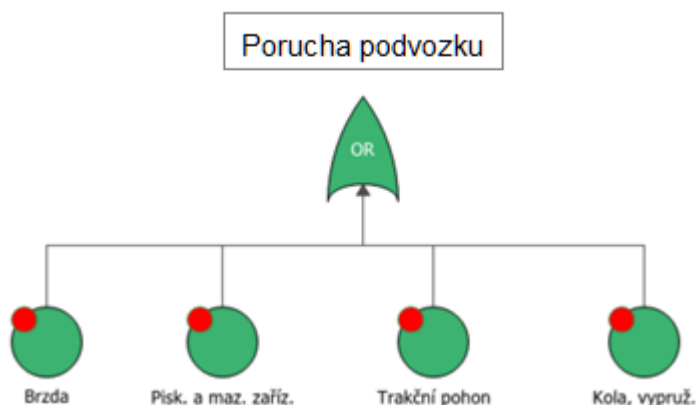
Pro lepší přehlednost je na následujícím obr. č. 5.4 zobrazena střední doba do poruchy jednotlivých konstrukčních skupin:



Obr. č. 5.4: Střední doby do poruchy konstrukčních skupin

## 5.2 Simulace životního cyklu podvozku tramvaje

Předtím, než určíme celkovou spolehlivost podvozků tramvaje, je zapotřebí provést simulaci životního cyklu. Při samotné simulaci využijeme SW BLOCKSIM, který je na základě stromu poruch podvozku a odhadnutých parametrů rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých konstrukčních skupin v SW WEIBULL ++ nasimulovat provozní život podvozku tramvaje.



Obr. č. 5.5: Strom poruch podvozku

Při simulaci musíme zahrnout preventivní údržbu preventivní údržby a údržbu po poruše. Jelikož došlo k inovaci SW BLOCKSIM, podařilo se do simulace zahrnout

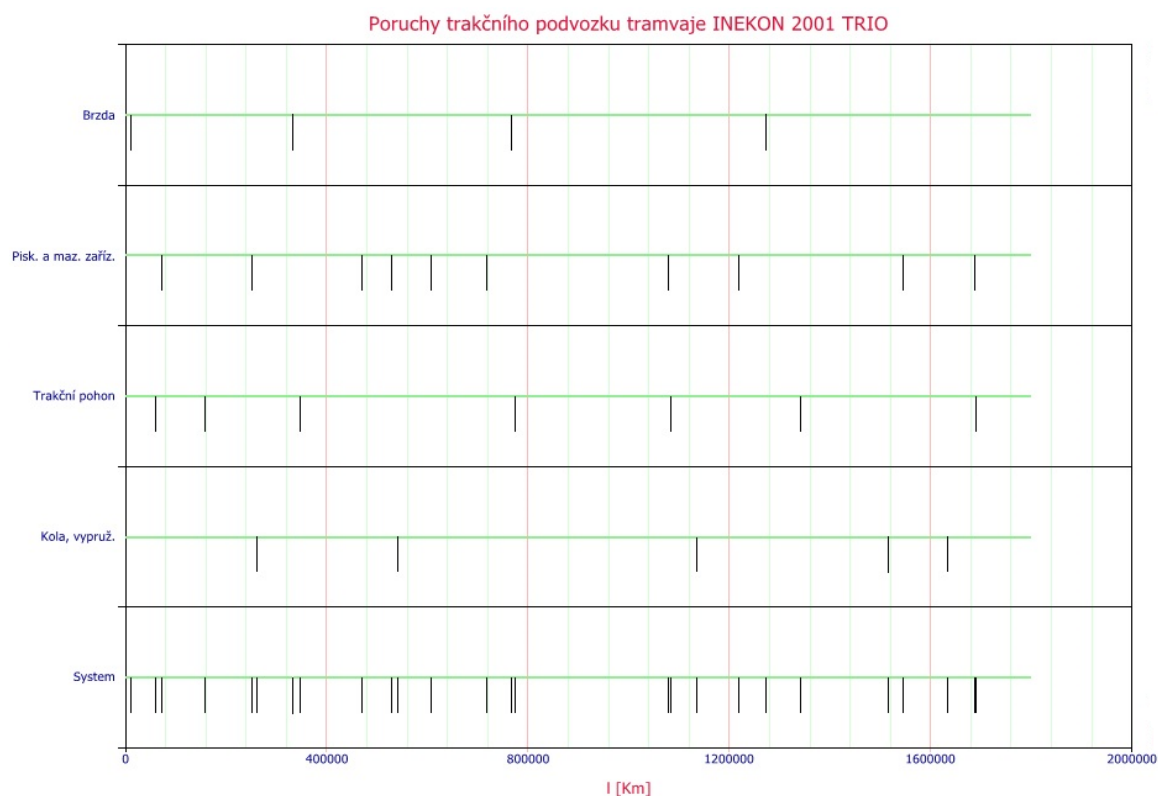


pouze údržbu po poruše. Preventivní údržba byla definována v pomoci Excelu. Po sjednocení obou typu údržby můžeme vyhodnotit inherentní a technickou pohotovost.

Při samotné simulaci předpokládáme dobu provozu podvozku 30 let, přičemž průměrně najede denně 164,4 km, to nám dává celkový simulační proběh 1 800 000 km. Před spuštěním samotné simulace bylo zapotřebí zadat všechny potřebné údaje:

- přiřadit konstrukční skupině model poruchovosti (z odhadu parametrů pomocí WEIBULL++)
- zadat parametry pro údržbu po poruše
  - o celková doba údržby
  - o pracnost
  - o cena za Nh
  - o celková cena za práci
  - o cena za náhradní díly
- nastavit parametry simulace Monte Carlo
  - o délka simulačního běhu
  - o počet výpočtových kroků
- spuštění simulace

Po dokončení simulace si necháme zobrazit průběh poruch podle jednotlivých konstrukčních skupinách.



Obr. č. 5.6: Průběh simulovaných poruch podvozku

Ze simulace si můžeme nechat vygenerovat spoustu parametrů. Pro Zásadní parametry jsou zapsány v tab. č. 5.12:

**Tab. č. 5.12: Výsledné parametry simulace životního cyklu podvozku**

parametr	výsledek
proběh simulace [km]	1 800 000
počet interakci	2 000 000
Počet poruch	28
MDBF [km]	63 848
Celková doba údržby po poruše [h]	210
Celková cena údržby po poruše [Kč]	462 225

V následující tab. č. 5.13 jsou uvedeny počty zásahu preventivní údržby podle jednotlivých stupňů, přičemž se nepředpokládá generální oprava.

Počet údržbových zásahu velké opravy a střední opravy vypočítáme podle vztahu:

$$\text{počet zásahu (VO)} = \frac{\text{celkový proběh za životní cyklus}}{\text{interval velké opravy}} - 1 \quad (5.1)$$

$$\text{počet zásahu (VO)} = \frac{1\,800\,000}{600\,000} - 1 = 2$$

$$\text{počet zásahu (SO)} = \frac{\text{celkový proběh za životní cyklus}}{\text{interval střední opravy}} - \text{počet zásahu (VO)} - 1 \quad (5.2)$$

$$\text{počet zásahu (SO)} = \frac{1\,800\,000}{200\,000} - 2 - 1 = 6$$

**Tab. č. 5.13: Počet zásahu preventivní údržby za životní cyklus**

stupeň PM	počet zásahu
denní prohlídka	10374
kontrolní prohlídka	171
střední oprava	6
velká oprava	2

V dalším postupu určíme celkový prostoj za preventivní údržbu. Doba údržby pro jednotlivé stupně vychází z podkladu o údržbě Dopravního podniku Ostrava, a.s.

Dílčí celkovou dobu údržby získáme jako součin doby údržby a počtu zásahu.

Celkovou dobu údržby během preventivní údržby získáme jako součet dílčích celkových dob údržby. Výsledné hodnoty jsou v tab. č. 5.14:

**Tab. č. 5.14: Celkové prostoje preventivní údržby**

stupeň PM	doba údržby (h)	počet zásahu	celková doba údržby (h)
velká oprava	3312	2	6624
střední oprava	1200	6	7200
kontrolní prohlídka	10	171	1710
denní prohlídka	0,07	10374	691,6
celkový prostoj PM			<b>16225,6</b>

Nyní máme vše připraveno pro vypočtení spolehlivosti podvozku.

### 5.3 Učení spolehlivosti podvozku

Míru spolehlivosti podvozků vyhodnotíme podle součinitele pohotovosti. Jelikož k dispozici jsme neměli hodnoty logistického a administrativního zpoždění, nejsme schopni vypočítat provozní pohotovost, nýbrž jen inherentní (vloženou) a technickou.

Pohotovost ze své definice znamená schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadované funkce v daném časovém okamžiku v daných podmínkách, tudíž platí [3]:

$$A = \frac{MUT}{MUT+MDT} \quad [-] \quad (5.3)$$

Kde:

$MUT$  – střední doba použitelného stavu [h],

$MDT$  - střední doba nepoužitelného stavu [h].

Při výpočtu inherentní pohotovosti neboli vložené se za střední hodnotu nepoužitelného stavu ( $MDT$ ) považuje střední doba nepoužitelného stavu vlivem údržby po poruše ( $MDT_{CM}$ ), pak platí vztah:

$$A_i = \frac{MUT}{MUT+MDT_{CM}} \quad [-] \quad (5.4)$$

Kde:

$MDT_{CM}$  - střední doba nepoužitelného stavu vlivem údržby po poruše [h].

Při dalším výpočtu do součinitele pohotovosti zahrneme i vliv preventivní údržby, přičemž získáme hodnotu technické pohotovosti:

$$A_t = \frac{MUT}{MUT + MDT_{CM} + MDT_{PM}} \quad [-] \quad (5.5)$$

Kde:

$MDT_{PM}$  - střední doba nepoužitelného stavu vlivem preventivní údržby [h].

V našem případě budeme při výpočtu inherentní a technické pohotovosti uvažovat se dvěma podvozky, které jsou na jedné tramvaji. Vstupní údaje pro výpočet jsou v následující tab. č. 5.15:

**Tab. č. 5.15: Vstupní hodnoty pro výpočet pohotovosti**

<i>životnost tramvaje [h]</i>	262800
<i>MUT [h]</i>	246154,4
<i>MDT [h]</i>	16645,6
<i>MDT<sub>CM</sub> [h]</i>	420
<i>MDT<sub>PM</sub> [h]</i>	16 225,6

Dosazením do vztahu (5.4) získám inherentní spolehlivost podvozků tramvaje:

$$A_i = \frac{246\,154,4}{246\,154,4 + 420} = 0,9983 = 99,83 \%$$

Hodnotu technické pohotovosti získáme po dosazení do vztahu (5.5):

$$A_t = \frac{246\,154,4}{246\,154,4 + 420 + 16\,225,6} = 0,9367 = 93,67 \%$$

Když porovnáme oba výsledky, tak je hned na první pohled patrné, že pohotovost nejvíce ovlivňuje preventivní údržba. Hodnota technické pohotovosti je i natolik vysoká, že není nutné intervaly preventivní údržby optimalizovat. V dnešní době se i tak dopravní podniky snaží preventivní údržbu odkládat na co možná nejpozdější termín z důvodu úspory finančních prostředků. Finančním nákladům za životní cyklus se bude věnovat poslední kapitola této práce.

## 6 Predikce nákladu LCC

V této kapitole se budeme zabývat předpovědi nákladu vynaložených na pořízení a provozování podvozků tramvaje za životní cyklus, který je 30 let, tj. 1 800 000 km. Náklady nejprve musíme rozdělit na pořizovací a vlastnické, následně podle vztahu (4.25) vyčíslíme celkovou predikci nákladu životního cyklu (LCC):

$$LCC = N_p + N_v$$

### Pořizovací náklady

Pořizovací náklady veškeré náklady spjaté s pořízením podvozku. Cena pořízení jednoho podvozku byla odborně odhadnuta na 4 250 000 Kč. Pořizovací náklady potom vypočítáme:

$$N_p = \text{cena jednoho podvozku} \cdot \text{počet podvozků na tramvaji} \quad [\text{Kč}] \quad (6.1)$$

$$N_p = 4\,250\,000 \cdot 2 = 8\,500\,000 \text{ Kč}$$

### Vlastnické náklady

Vlastnické náklady jsou takové náklady, které jsou vynakládány na bezporuchový stav podvozku. Vlastnické náklady jsou dále rozděleny na:

- náklady na preventivní údržbu
- náklady na údržbu po poruše

#### Náklady na preventivní údržbu

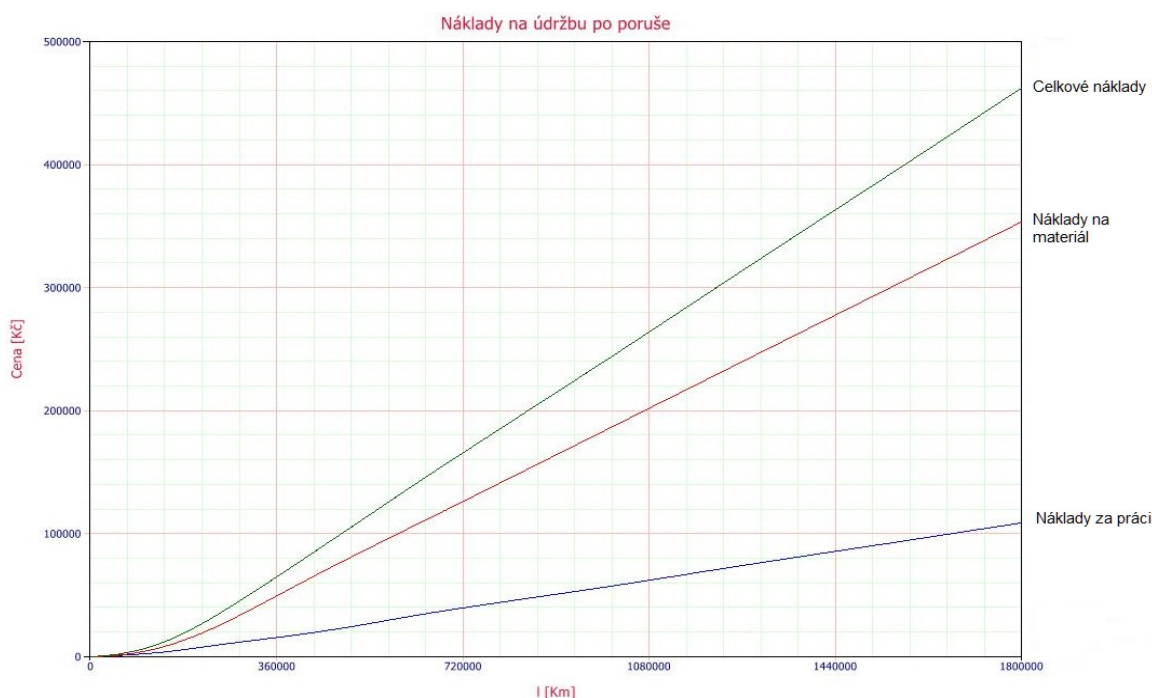
Veškeré náklady spjaté s preventivní údržbou jsou definovány podle jednotlivých stupňů v následující tab. č. 6.1. Detailní rozklad nákladu na preventivní údržbu je uvedena v příloze F této práce. [6]

**Tab. č. 6.1: Náklady na preventivní údržbu**

stupeň údržby	pracnost [Nh]	cena za práci [Kč]	cena za materiál [Kč]	celková cena údržby [Kč]
velká oprava	1560	780 000	2 020 000	2 800 000
střední oprava	336	168 000	732 000	900 000
kontrolní prohlídka	513	256 500	566 010	822 510
denní prohlídka	691,6	207 480	1 244 880	1 452 360
$\Sigma$	<b>3100,6</b>	<b>1 411 980</b>	<b>4 562 890</b>	<b>5 974 870</b>

### Náklady na údržbu po poruše

Náklady po poruše jsme získali ze simulace životního cyklu podvozku tramvaje v SW BLOCKSIM. Na následujícím obr. č. 6.1 můžeme sledovat průběh nákladu za práci a za materiál. Nesmíme však zapomenout, že náklady ze simulace musíme vynásobit počtem podvozků na tramvaji, tím získáme celkové náklady na údržbu po poruše.



Obr. č. 6.1: Průběh nákladu na údržbu po poruše

Z Výpisu simulace byly odečteny potřebné parametry, která jsou charakterizovány v tab. č. 6.2:

**Tab. č. 6.2: Náklady na údržbu po poruše jednoho podvozku**

typ údržby	pracnost [Nh]	cena za práci [Kč]	cena za materiál [Kč]	celková cena údržby [Kč]
údržba po poruše	210	108 780	353 445	<b>462 225</b>

Rozčlenění nákladu podle jednotlivých konstrukčních skupin, nebo rozložení pracnosti na jednotlivé profese je uvedeno v příloze G.

Celkové vlastnické náklady vypočítáme:

$$N_v = \text{náklady na preventivní údržbu} + 2 \cdot \text{náklady na údržbu po poruše} \quad [\text{Kč}] \quad (6.2)$$

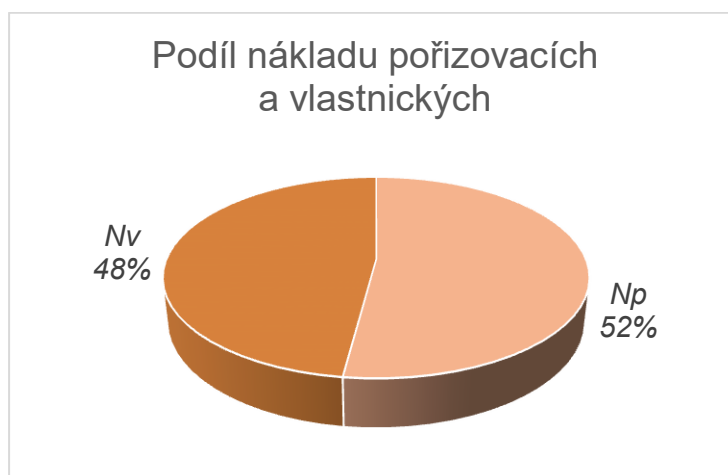
$$N_v = 5\,974\,870 + 2 \cdot 462\,225 = 6\,899\,320 \text{ Kč}$$

Nyní se dostáváme samotnému vyčíslení celkové predikce LCC za dva podvozky na tramvaji INEKON 2001 TRIO.

$$LCC = N_p + N_v$$

$$LCC = 7\,500\,000 + 6\,899\,320 = 14\,399\,320 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na dva podvozky na tramvaji INEKON 2001 TRIO za 30 let provozu jsou předpokládány na 14 399 320 Kč. Podíl mezi pořizovacími náklady a náklady na údržbu jsou na obr. č. 6.2:



Obr. č. 6.2: Podíl pořizovacích a vlastnických nákladů

## 7 Závěr

V této diplomové práci bylo cílem posoudit spolehlivost trakčního podvozku pro tramvaj INEKON 2001 TRIO, a na základě dat spolehlivosti predikovat celkové náklady během životního cyklu. Životní cyklus trakčního podvozku je 30 let, při kterém najezdí přibližně 1 800 000 km.

Pro vyhodnocování spolehlivosti bylo nutné mít vstupní data, které poskytl Dopravní podnik Ostrava, a.s. Vstupní data byly selektována podle jednotlivých konstrukčních skupin. Pro vyhodnocení dat pak byl použit profesionální software WEIBULL++, který jsem se mohl během vypracovávání diplomové práce naučit. Tohoto pomocníka jsem s velkou výhodou využíval k odhadům parametrů rozdělení pravděpodobnosti. Pro porovnání správnosti postupu a výsledků jsem také využil tabulkového procesoru Excel, avšak pouze pro vzorový výpočet.

U všech konstrukčních skupin nejlépe vstupní data vystihuje dvouparametrické Weibullovo rozdělení, kromě konstrukční skupiny kola a vypružení, kde je použité mixované Weibullovo rozdělení (tj. spojení dvou Weibullových rozdělení).

Na základě odhadnutých parametrů rozdělení pravděpodobnosti všech konstrukčních skupin se provedla simulace životního cyklu podvozku. Na tuto simulaci byl využit profesionální software BLOCKSIM, který je nástavbou softwaru WEIBULL++. Díky tomu jsme výsledky odhadu parametrů propojili se simulací. Po simulaci životního cyklu 30 let (1 800 000 km) jsme dospěli k výsledkům, že průměrný počet poruch na jeden trakční podvozek tramvaje je 28 poruch s odchylkou  $\pm 3$  poruchy. Střední ujetá vzdálenost mezi poruchami je 63 848 km. Celková doba údržby po poruše je odhadovaná na 210 hodin na jeden podvozek, tudíž na celou tramvaj je prostoj odhadnut na 420 hodin. Při simulaci v softwaru BLOCKSIM se nepodařilo zahrnout preventivní údržbu z důvodu změny přechodu na novější verzi a omezenost demo verze pouze na dva stupně preventivní údržby. Preventivní údržba je tudíž zpracovaná samostatně v tabulkovém procesoru Excel a je platná pro dva podvozky. Preventivní údržba čítá celkem 10 533 údržbových zásahů s celkovým prostojem 16 225,6 hodin.

Posouzení spolehlivosti trakčních podvozků nejlépe vystihuje hodnota pohotovosti. Inherentní neboli vložená spolehlivost dosahuje 99,83 %. Tato hodnota je velice vysoká a napovídá nám, že konstrukční řešení trakčních podvozků je zvolené vhodně s ohledem na celkovou spolehlivost. Když zahrneme preventivní údržbu a údržbu po poruše, tak získáme hodnotu technické pohotovosti a ta dosahuje hodnoty 93,67 %, přičemž nevíce hodnotu ovlivňuje preventivní údržba. Optimalizovat intervaly preventivní údržby v dnešní době nemá příliš velký smysl, jelikož provozovatele vozidel odkládají preventivní



údržbu na co možná nejpozdější termín. Tímto přístupem snižují náklady na preventivní údržbu, ale také zvyšují riziko poruchy během provozu. Hodnotu provozní pohotovosti není možné určit z důvodu nedostatku informací o logistickém a administrativním zpoždění při údržbě.

Predikce nákladu životního cyklu je uvažovaná pro dva trakční podvozky, kterými tramvaj disponuje. Pořizovací náklady jsou vyčísleny na hodnotu 7 500 000 Kč. Vlastnické náklady jsou složeny z nákladu na preventivní údržbu a na údržbu po poruše. Preventivní údržba je vyčíslena na částku 5 974 870 Kč. Náklady na údržbu po poruše jsou odhadujeme na částku 824 510 Kč. Celkové náklady dvou trakčních podvozků za 30 let provozu jsou odhadovány na částku 14 399 320 Kč.

## Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] FAMFULÍK, J. a kol.: Zkoušky spolehlivosti. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2277-8.
- [2] FAMFULÍK, J.: Teorie údržby. VŠB – TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1029-8
- [3] DANĚK, A.: Výpočetní metody obnovy dopravních prostředků. Repronis, Ostrava, 1999. ISBN 80-86122-41-7
- [4] ČSN IEC 61650: 1998, Techniky analýzy dat o bezporuchovosti
- [5] Firemní podklady Inekon Group, a.s.
- [6] Firemní podklady Dopravní podnik Ostrava, a.s.

## Seznam obrázků

Obr. č. 1.1	Typový výkres tramvaje INEKON 2001 TRIO	- str. 15
Obr. č. 2.1	Půdorys konstrukčního řešení trakčního podvozku	- str. 17
Obr. č. 2.2	Půdorys konstrukčního řešení dvojkolí	- str. 18
Obr. č. 2.3	Základní uspořádání vypruženého kola	- str. 19
Obr. č. 2.4	Pohled na konstrukční uspořádání ložiskového domku	- str. 19
Obr. č. 2.5	Řez sekundárním vypružením	- str. 20
Obr. č. 2.6	Řez zubovou spojkou KWD – ZK 110-2	- str. 21
Obr. č. 2.7	Řez nápravovou převodovkou	- str. 22
Obr. č. 2.8	Brzdová jednotka kotoučové brzdy KNORR – BREMSE	- str. 23
Obr. č. 4.1	Průběh hustoty pravděpodobnosti	- str. 28
Obr. č. 4.2	Průběh distribuční funkce	- str. 29
Obr. č. 4.3	Průběh bezporuchovosti	- str. 29
Obr. č. 4.4	Průběh hustoty pravděpodobnosti pro různé hodnoty parametru tvaru	- str.32
Obr. č. 4.5	Průběh distribuční funkce pro různé hodnoty parametru tvaru	- str. 32
Obr. č. 4.6	Intenzita poruch u Weibullova rozdělení	- str. 33
Obr. č. 4.7	Zobrazení hradla OR	- str. 36
Obr. č. 4.8	Zobrazení hradla AND	- str. 37
Obr. č. 4.9	Ilustrace dělby nákladu	- str. 38
Obr. č. 5.1	Graf lineární regrese pískovacího a mazacího zařízení	- str. 42
Obr. č. 5.2	Graf lineární regrese pískovacího a mazacího zařízení SW WEIBULL++	- str. 45
Obr. č. 5.3	Průběh distribučních funkcí $F(t)$ obou postupů	- str. 46
Obr. č. 5.4	Střední doba do poruchy konstrukčních skupin	- str. 48
Obr. č. 5.5	Strom poruch podvozku	- str. 48
Obr. č. 5.6	Průběh poruch podvozku	- str. 49
Obr. č. 6.1	Průběh nákladu na údržbu po poruše	- str. 54
Obr. č. 6.2	Podíl pořizovacích a vlastnických nákladů	- str. 55

## Seznam tabulek

Tab. č. 1.1	Technické parametry tramvaje	- str. 14
Tab. č. 4.1	Pravdivostní tabulka hradlo OR	- str. 36
Tab. č. 4.2	Pravdivostní tabulka hradlo AND	- str. 37
Tab. č. 5.1	Příklad výpočtu mediánového pořadí nahrazující hodnotu distribuční funkce výběrového rozdělení pravděpodobnosti	- str. 41
Tab. č. 5.2	Příklad výpočtu přirozeného logaritmu kilometrického proběhu při poruše	- str. 42
Tab. č. 5.3	Příklad výpočtu hodnoty $y_i$	- str. 42
Tab. č. 5.4	Tabelární přehled parametrů pískovacího a mazacího zařízení	- str. 43
Tab. č. 5.5	Výpočet rozdílů distribučních funkcí	- str. 44
Tab. č. 5.6	Tabelární přehled parametrů pískovacího a mazacího zařízení ze SW WEIBULL++	- str. 45
Tab. č. 5.7	Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro postup v Excelu	- str. 46
Tab. č. 5.8	Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro postup v SW WEIBULL++	- str. 46
Tab. č. 5.9	Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro brzdové zařízení	- str. 47
Tab. č. 5.10	Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro trakční pohon	- str. 47
Tab. č. 5.11	Výsledné hodnoty odhadu parametrů pro kola a vypružení	- str. 47
Tab. č. 5.12	Výsledné parametry simulace životního cyklu podvozku	- str. 50
Tab. č. 5.13	Počet zásahu preventivní údržby za životní cyklus	- str. 50
Tab. č. 5.14	Celkové prostoje preventivní údržby	- str. 51
Tab. č. 5.15	Vstupní hodnoty pro výpočet pohotovosti	- str. 52
Tab. č. 6.1	Náklady na preventivní údržbu	- str. 53
Tab. č. 6.2	Náklady na údržbu po poruše	- str. 54

## Seznam příloh

Příloha A	kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov – Smirnov
Příloha B	odhad parametrů rozdělení (pískovací a mazací zařízení)
Příloha C	odhad parametrů rozdělení (brzdové zařízení)
Příloha D	odhad parametrů rozdělení (trakční pohon)
Příloha E	odhad parametrů rozdělení (kola a vypružení)
Příloha F	náklady na preventivní údržbu
Příloha G	náklady na údržbu po poruše
Multimediální příloha ve formě přiloženého CD	

## Příloha A – kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov – Smirnov

n	$D_{n, 0,9}$	$D_{n,0,95}$	$D_{n, 0,99}$	n	$D_{n, 0,9}$	$D_{n,0,95}$	$D_{n, 0,99}$
1	0,950	0,975	0,995	26	0,233	0,259	0,311
2	0,776	0,842	0,929	27	0,229	0,254	0,305
3	0,636	0,708	0,829	28	0,225	0,250	0,300
4	0,565	0,624	0,734	29	0,221	0,246	0,295
5	0,509	0,563	0,669	30	0,218	0,242	0,290
6	0,468	0,519	0,617	31	0,214	0,238	0,285
7	0,436	0,483	0,576	32	0,211	0,234	0,281
8	0,410	0,454	0,542	33	0,208	0,231	0,277
9	0,387	0,430	0,513	34	0,205	0,227	0,273
10	0,369	0,409	0,489	35	0,202	0,224	0,269
11	0,352	0,391	0,468	36	0,199	0,221	0,265
12	0,338	0,375	0,449	37	0,196	0,218	0,262
13	0,325	0,361	0,432	38	0,194	0,215	0,258
14	0,314	0,349	0,418	39	0,191	0,213	0,255
15	0,304	0,338	0,404	40	0,189	0,210	0,252
16	0,295	0,327	0,392	41	0,187	0,208	0,249
17	0,286	0,318	0,380	42	0,185	0,205	0,246
18	0,279	0,309	0,371	43	0,183	0,203	0,243
19	0,271	0,301	0,361	44	0,181	0,201	0,241
20	0,265	0,294	0,352	45	0,179	0,198	0,238
21	0,259	0,287	0,344	46	0,177	0,196	0,235
22	0,253	0,281	0,337	47	0,175	0,194	0,233
23	0,247	0,275	0,330	48	0,173	0,192	0,231
24	0,242	0,269	0,323	49	0,171	0,190	0,228
25	0,238	0,264	0,317	50	0,170	0,188	0,226

Pro  $n > 50$  platí přibližně:

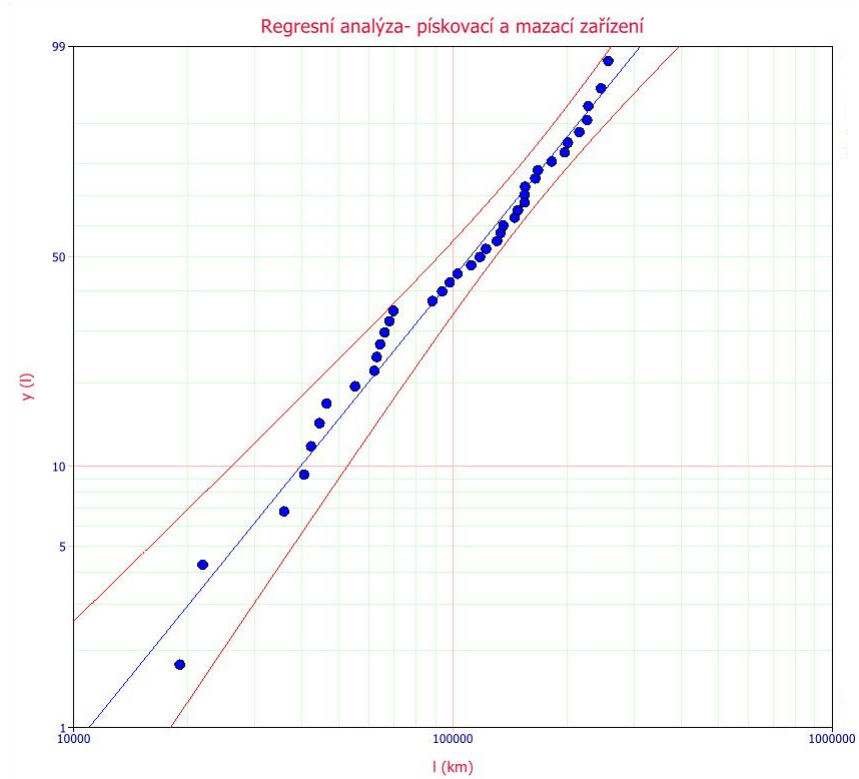
$$D_{n; 0,9} = \frac{1,22}{\sqrt{n}},$$

$$D_{n; 0,95} = \frac{1,36}{\sqrt{n}},$$

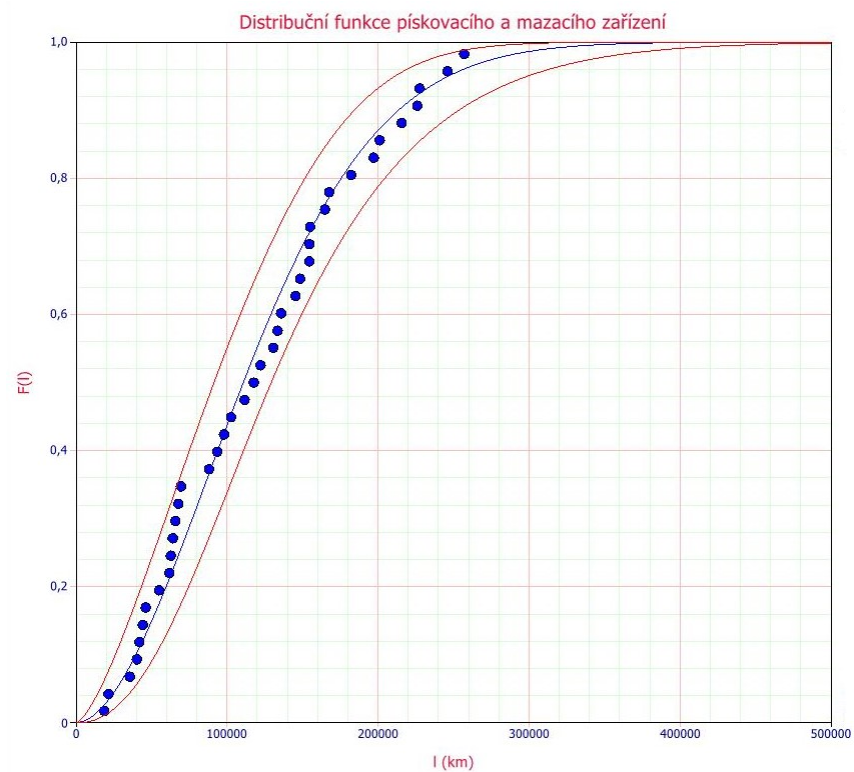
$$D_{n; 0,99} = \frac{1,63}{\sqrt{n}}$$

Obr. č. A.1: Kritické hodnoty pro test dobré shody Kolmogorov – Smirnov  $D_{n; 1-\alpha}$

## Příloha B – odhad parametrů rozdělení (pískovací a mazací zařízení)

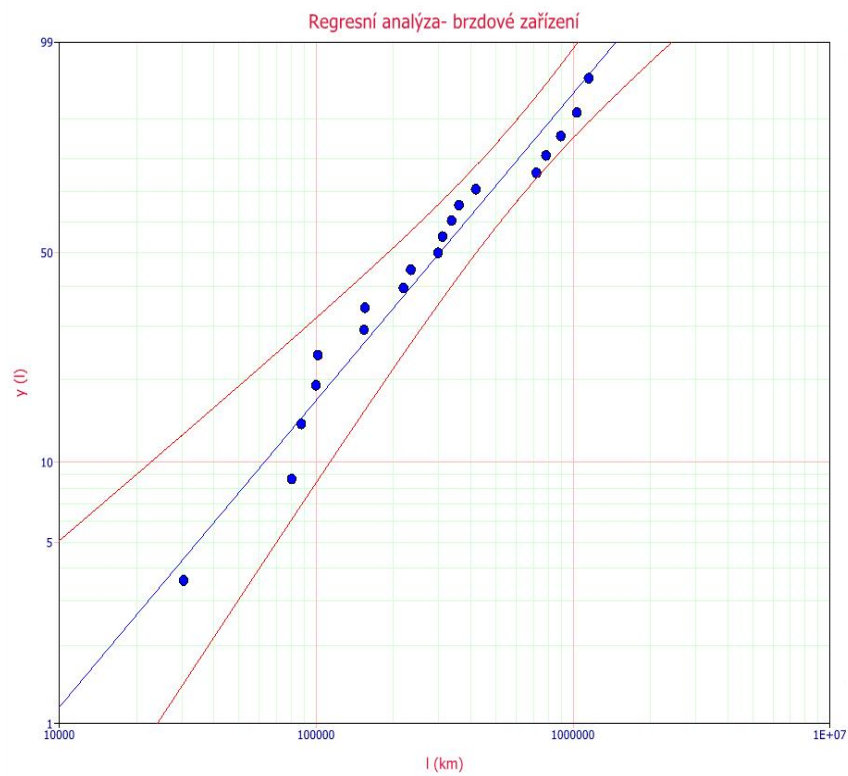


Obr. č. B.1: Odhad parametrů – lineární regrese

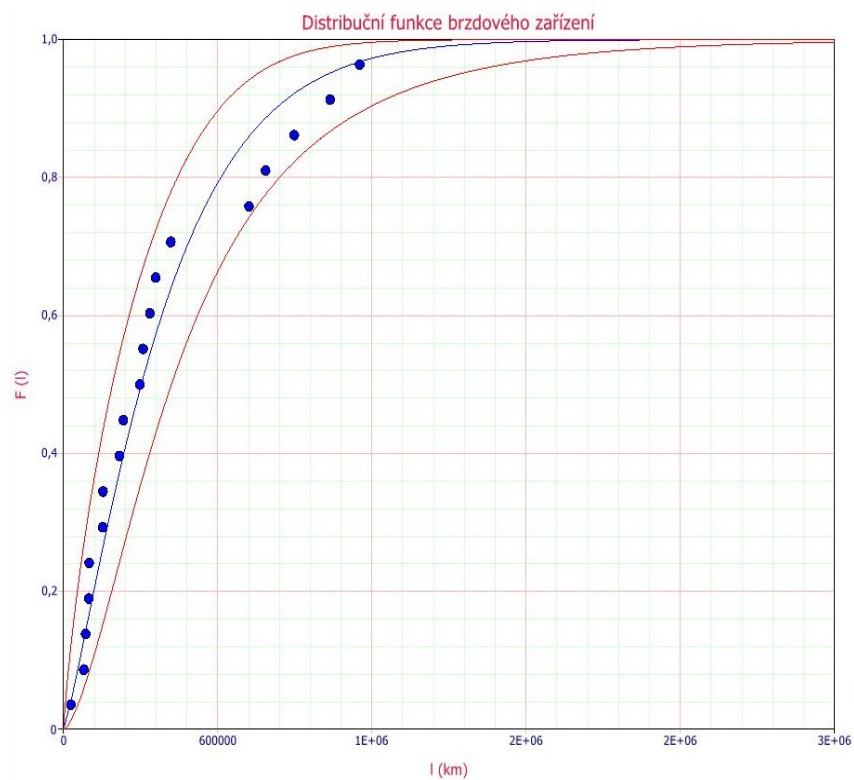


Obr. č. B.2: Průběh distribuční funkce

## Příloha C – odhad parametrů rozdělení (brzdové zařízení)



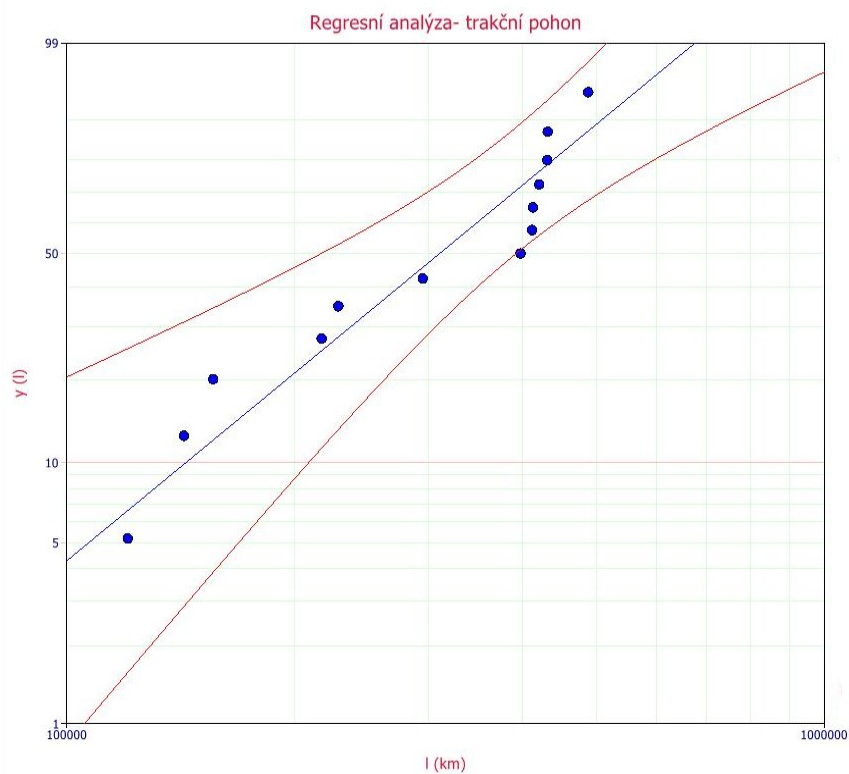
Obr. č. C.1: Odhad parametrů – lineární regrese



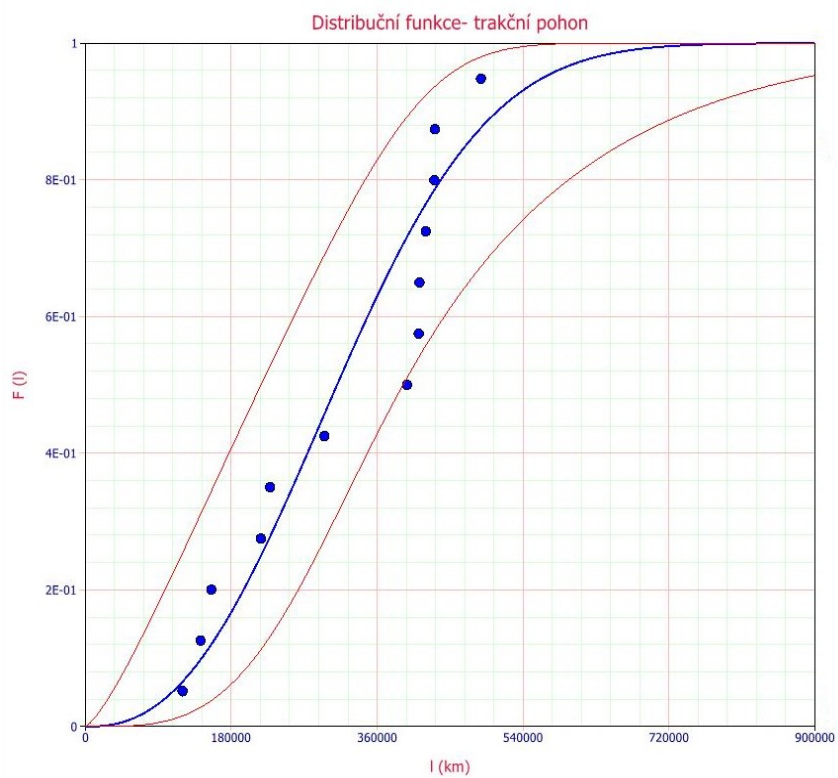
Obr. č. C.2: Průběh distribuční funkce



## Příloha D – odhad parametrů rozdělení (trakční pohon)

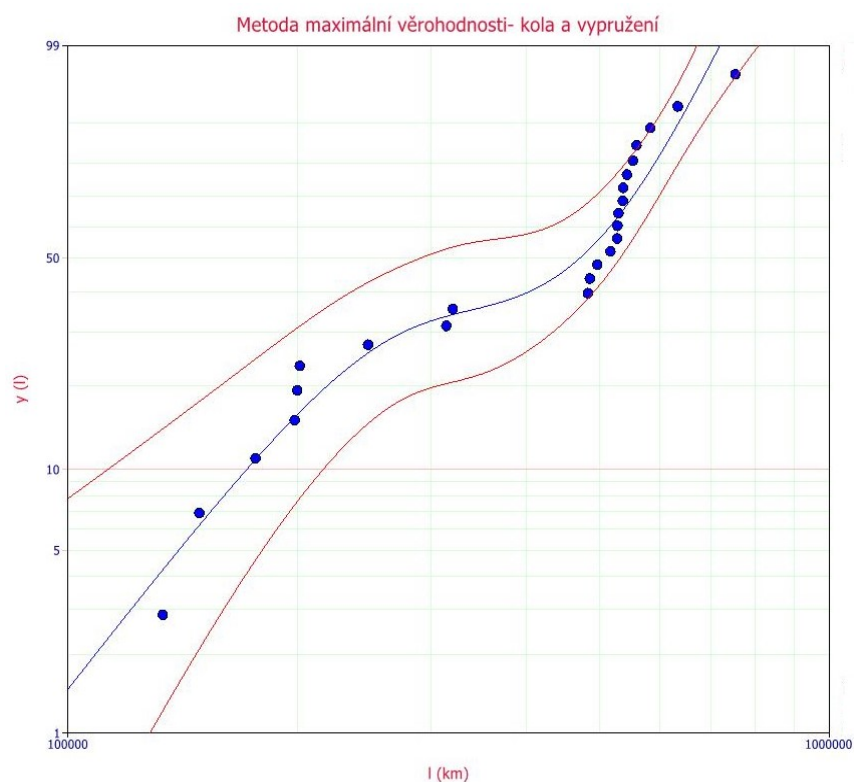


Obr. č. D.1: Odhad parametrů – lineární regrese

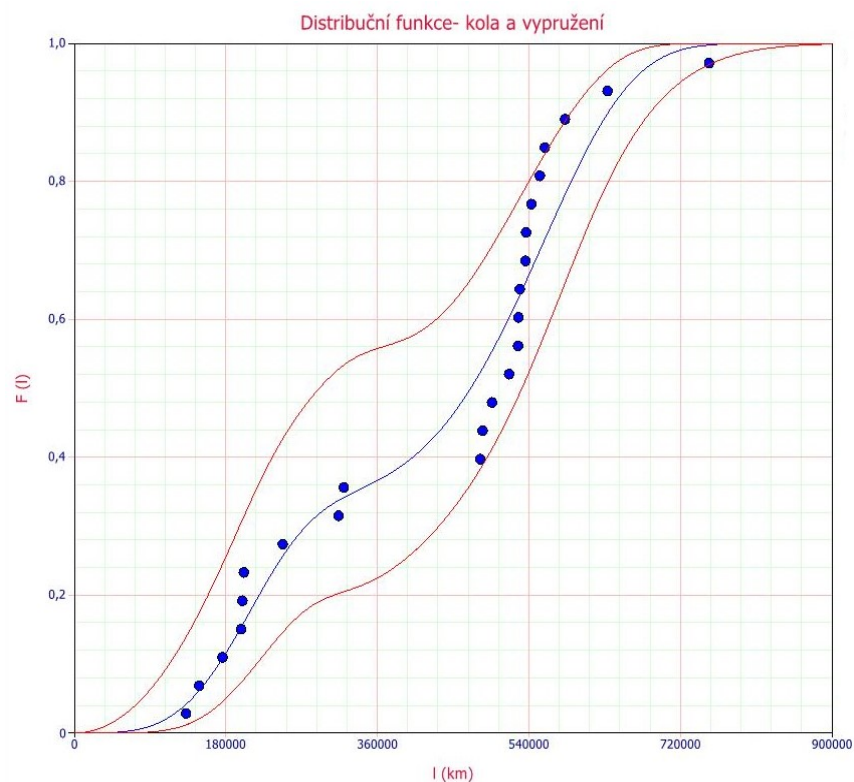


Obr. č. D.2: Průběh distribuční funkce

## Příloha E – odhad parametrů rozdělení (kola a vypružení)



Obr. č. E.1: Odhad parametrů – metoda maximální věrohodnosti



Obr. č. E.2: Průběh distribuční funkce

## Příloha F – náklady na preventivní údržbu

velká oprava						
<u>práce:</u>	pracovník	pracnost/ zásah (Nh)	počet zásahu	pracnost (Nh)	sazba (Kč/Nh)	cena práce (Kč)
	mechanik	586	2	1 172	500	586 000
	elektrikář	194	2	388	500	194 000
				1 560		780 000
<u>materiál:</u>	cena materiálu/ zásah (Kč/zás.)	počet zásahu	celková cena materiálu (Kč)			
	1 010 000	2	2 020 000			
<u>souhrn:</u>	celková pracnost (Nh)	celková cena práce (Kč)	celková cena za materiál (Kč)	celková cena velké opravy (Kč)		
	1 560	780 000	2 020 000	2 800 000		

střední oprava						
<u>práce:</u>	pracovník	pracnost/ zásah (Nh)	počet zásahu	pracnost (Nh)	sazba (Kč/Nh)	cena práce (Kč)
	mechanik	46	6	276	500	138 000
	elektrikář	10	6	60	500	30 000
				336		168 000
<u>materiál:</u>	cena materiálu/ zásah (Kč/zás.)	počet zásahu	celková cena materiálu (Kč)			
	122 000	6	732 000			
<u>souhrn:</u>	celková pracnost (Nh)	celková cena práce (Kč)	celková cena za materiál (Kč)	celková cena velké opravy (Kč)		
	336	168 000	732 000	900 000		

Obr. č. F.1: Rozvržení nákladů na preventivní údržbu (velká a střední oprava)

kontrolní prohlídka						
práce:	pracovník	pracnost/ zásah (Nh)	počet zásahu	pracnost (Nh)	sazba (Kč/Nh)	cena práce (Kč)
	mechanik	2	171	342	500	171 000
	elektrikář	1	171	171	500	85 500
				513		256 500
materiál:	cena materiálu/ zásah (Kč/zás.)	počet zásahu	celková cena materiálu (Kč)			
	3 310	171	566 010			
souhrn:	celková pracnost (Nh)	celková cena práce (Kč)	celková cena za materiál (Kč)	celková cena velké opravy (Kč)		
	513	256 500	566 010	822 510		

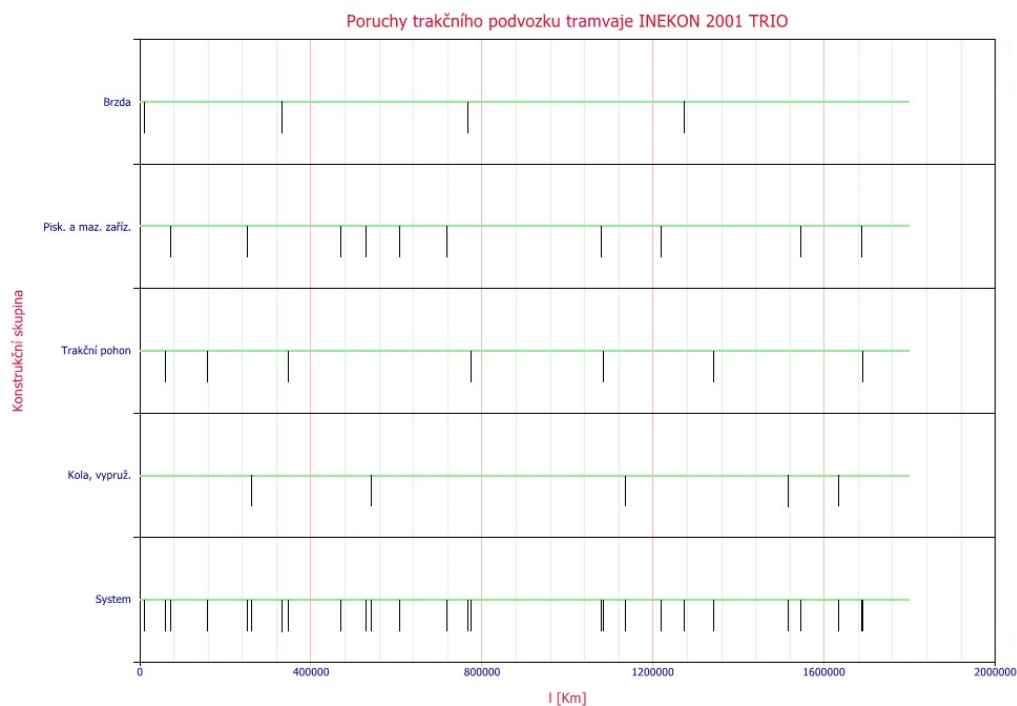
denní prohlídka						
práce:	pracovník	pracnost/ zásah (Nh)	počet zásahu	pracnost (Nh)	sazba (Kč/Nh)	cena práce (Kč)
	řidič	0,07	10374	691,6	300	207 480
				691,6		207 480
materiál:	cena materiálu/ zásah (Kč/zás.)	počet zásahu	celková cena materiálu (Kč)			
	120	10374	1 244 880			
souhrn:	celková pracnost (Nh)	celková cena práce (Kč)	celková cena za materiál (Kč)	celková cena velké opravy (Kč)		
	691,6	207 480	1 244 880	1 452 360		

Obr. č. F.2: Rozvržení nákladu preventivní údržba (kontrolní a denní prohlídka)

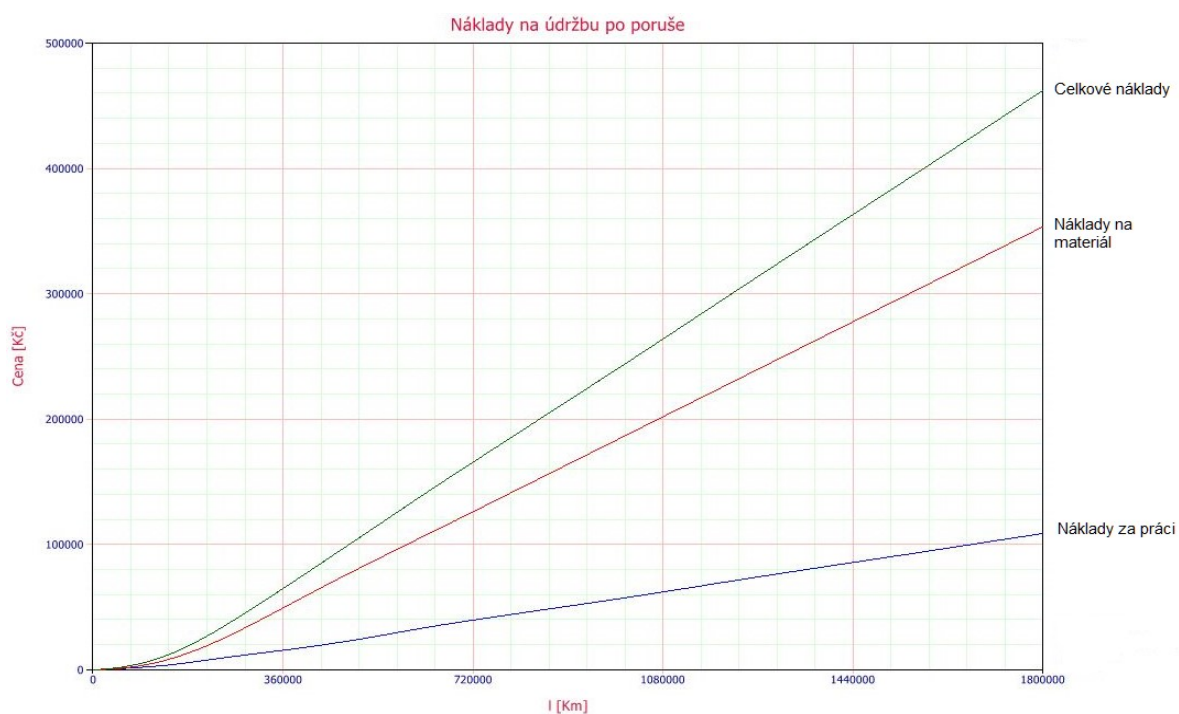
Celkové náklady na preventivní údržbu				
stupeň údržby	pracnost (Nh)	cena za práci (Kč)	cena za materiál (Kč)	celková cena velké opravy (Kč)
velká oprava	1560	780 000	2 020 000	2 800 000
střední oprava	336	168 000	732 000	900 000
kontrolní prohlídka	513	256 500	566 010	822 510
denní prohlídka	691,6	207 480	1 244 880	1 452 360
<b>Σ</b>	<b>3100,6</b>	<b>1 411 980</b>	<b>4 562 890</b>	<b>5 974 870</b>

*Obr. č. F.3: Celkový přehled nákladu na preventivní údržbu*

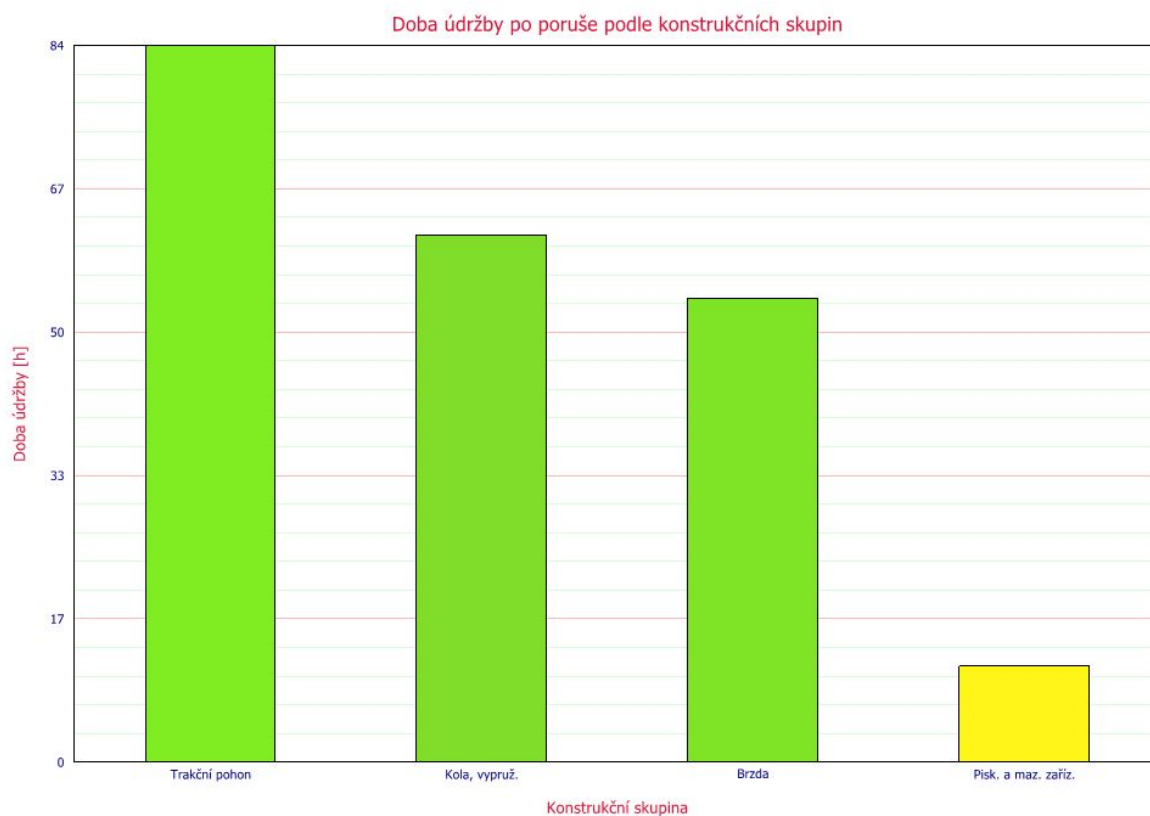
## Příloha G – náklady na údržbu po poruše



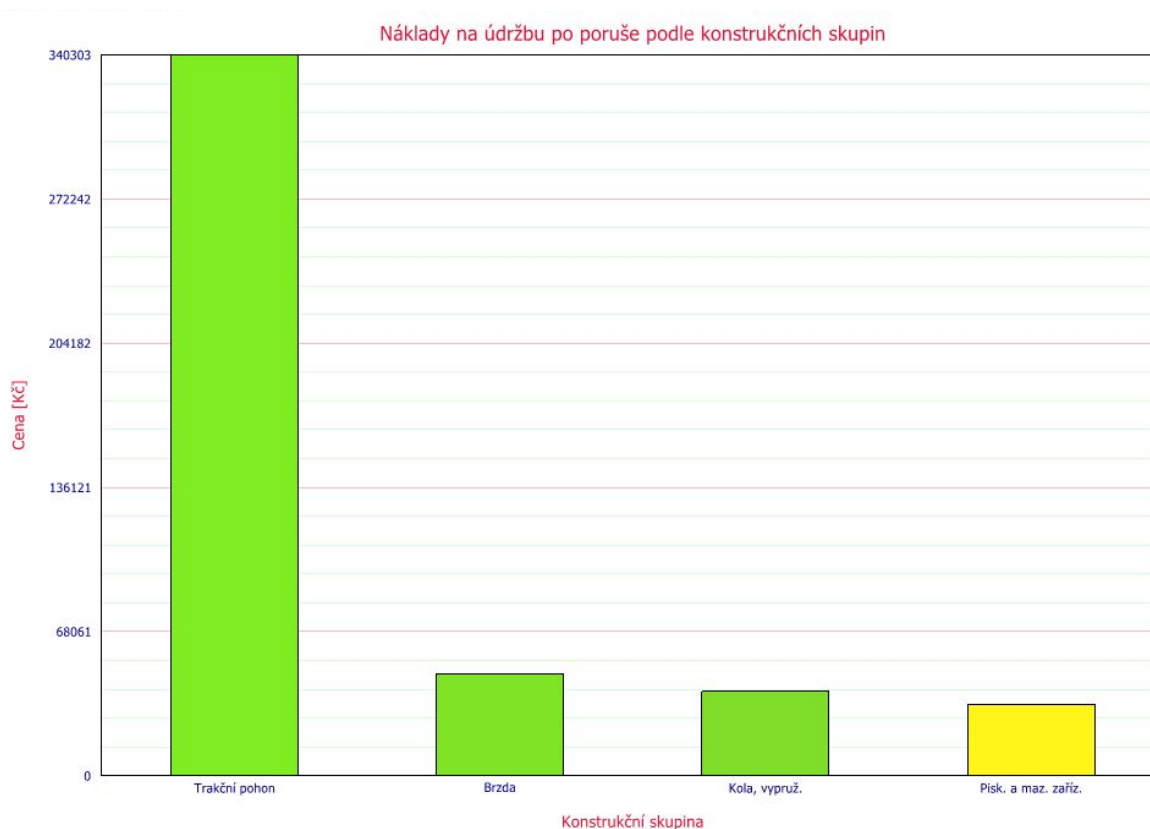
Obr. č. G.1: Simulace poruch během životního cyklu podvozku



Obr. č. G.2: Rozvržení nákladu na údržbu po poruše



Obr. č. G.3: Doba údržby podle konstrukčních skupin za životní cyklus podvozku



Obr. č. G.4: Rozvržení nákladu na údržbu po poruše podle konstrukčních skupin